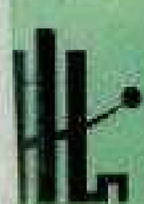
全国优秀博士学位论文专项资金资助

系统工程理论与实践（修订版）

陈庆华　等著

XITONG GONGCHENG
LILUN YU SHIJIAN



国防工業出版社
National Defense Industry Press

作者简介

陈庆华 1945年3月出生，山东平邑人，装备学院教授，博士生导师。1968年山东大学数学专业本科毕业，大学毕业后，曾到炮兵三十二师当兵锻炼，后到山东省新泰县石莱乡小河北学校任教。1978年考取山东大学运筹学专业研究生，1981年研究生毕业，分配到国防科技大学系统工程与数学系工作。参与创建军事运筹学教研室、中国人民解放军军事运筹学会、我国军事运筹学学科。担任中国运筹学会理事，全军军事运筹学会历届常务理事，中国系统工程学会军事系统工程委员会副主任委员。牵头完成多项重大课题，获得国家教学成果二等奖，全国教育科研成果二等奖，国家科技进步三等奖，军队教学成果一等奖，军队级科技进步一等奖，全军军事科研二等奖，军队科技进步二等奖，光华基金奖等。公开发表学术论文60余篇，编著出版教材专著《高等数学》、《军事运筹学》、《装备运筹学》、《系统工程方法论》、《拟阵》、《整数规划》、《组合最优化技术及其应用》等多部。指导的研究生学位论文，先后获得全军优秀硕士论文，全军优秀博士论文，全国优秀博士论文。被国家教育委员会评为全国做出突出贡献的中国学位研究生，享受政府特殊津贴和军队一类岗位津贴，获军队院校育才奖金奖，先后荣立三等功3次，二等功1次。

系统工程理论与实践
（修订版）

陈庆华　吕　彬　李晓松　著

国防工业出版社
·北京·

内容简介

本书以装备领域的决策优化问题为切入点，系统地介绍了系统工程的理论与方法，并进行了实例分析。全书共分为9章，其中第1章建立系统工程的概念。第2章研究系统工程常用的运筹学方法。从第3章到第8章，每章都从作者经历的具体实例入手，研究论述系统工程的思维方法与逻辑过程，力求将复杂问题的求解简单化。第9章分析了11个典型案例。

本书可作为军事装备学、军事运筹学、作战指挥学、军事后勤学等专业的研究生教材，也可供有关专业的军校教师、研究生和高年级本科学员以及从事装备发展论证、装备采购、装备管理保障等工作的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

系统工程理论与实践/陈庆华等著. —修订版.
—北京：国防工业出版社，2011.10
ISBN 978-7-118-07775-9

Ⅰ.①系… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①系统工程 Ⅳ.
①N945

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第215119号

※

国防工业出版社出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路23号　邮政编码100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本710×960　1/16　印张16　字数400千字
2011年10月第2版第1次印刷　印数1—3000册　定价42.00元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010)68428422　发行邮购：(010)68414474
发行传真：(010)68411535　发行业务：(010)68472764

再版前言

为适应军事装备学学科建设与研究生培养的需要，在总装备部司令部军训局和装备学院训练部的支持下，《系统工程理论与实践》一书于2009年12月出版。该书出版后，该领域的专家和读者提出了一些修改建议，根据这些建议，由陈庆华、吕彬、李晓松等共同讨论，由陈庆华执笔完成了再版（修订版）。作为研究生导师，陈庆华指导的博士生吕彬完成的博士学位论文于2009年被评为全国优秀博士学位论文，指导的博士生李晓松完成的博士学位论文于2010年被评为总装备部优秀博士论文。本书的出版得到了教育部的专项资助和总装备部的专项资助，也得到了装备学院装备指挥教研团队的资助。

本书以装备管理领域的实际问题为牵引，以装备管理领域的决策优化为切入点，对已经在军事装备管理领域得到广泛运用的系统工程理论与方法进行了梳理、总结和分析。本书力求从宏观的角度，尽可能体现整体指导局部的意图，将马克思主义的辩证唯物论与现代科学技术相结合，采用定性与定量分析的手段，通过研究装备发展论证、科研、采购、保障，直至装备退役、报废、转移的全系统、全寿命管理活动中的决策优化问题，阐述系统工程的理论与方法。本书尽可能减少运筹学中有关数学基础的论证，以“案例剖析”为导向，由浅入深地介绍数学建模和求解方法，力求通俗与实用。

本书共9章，内容包括系统与系统工程；系统工程常用的运筹学方法；系统分析；系统预测；系统模型；系统模拟；系统评价；系统决策；系统工程典型案例等。其中第1章建立系统工程的概念；第2章研究系统工程常用的运筹学方法；从第3章到第8章，研究论述了系统工程的思维方法与逻辑过程；第9章分析了11个典型案例。

书中的部分案例是作者在实际应用系统工程进行研究的成果总结，阅读这些案例可以帮助读者理解和掌握系统工程的有关理论和方法。在本书写作过程中，作者阅读了国内外相关学者的许多参考文献，从中吸收了许多重要的研究成果，并在书中加以标注。作者对这些学者在系统工程领域所做出的重

要贡献表示崇高的敬意，并对引用他们的成果感到荣幸。

在本书写作过程中，作者得到了汪浩教授、郭桂蓉院士、卢锡城院士、陈火旺院士、汪应洛院士、王众坨院士、刘源张院士等的支持和关心，得到了宋华文、薛勇、郭全魁、刘伟、刘国庆、侯妍、舒绍干等的帮助，在此表示衷心感谢。在此，还要特别感谢张炜、李元左、陈浩光等教授，他们参与了该书第一版的写作，对本书的再版给与了大力的支持和帮助。

由于作者水平所限，书中一定存在谬误，敬请广大读者批评指正。

陈庆华

2010.12.31

目 录

第1章 系统与系统工程

1.1 系统概述

系统工程(Systems Engineering,SE)的研究对象是系统(System)。系统概念是系统工程的核心和基本概念。"系统"一词在汉语中,通常是作为名词来使用的,有时也作为形容词和副词使用;作为系统工程的科学术语,则需要在日常用语的基础上加以提炼和界定。

系统无处不在。自然界和人类社会存在着多种多样的系统,例如:银河系,太阳系,地球;人类,中华民族;马克思主义,毛泽东思想,邓小平理论,"三个代表"重要思想,科学发展观;长江流域,黄土高原,珠江三角洲,环渤海经济区,西部大开发,东北老工业区,革命老区;三峡工程,全国铁路交通系统;国防教育,军事通信网,装备订货系统,装备保障系统,航天发射系统,"神舟"七号;索马里护航,抗击"非典",举办"奥运",汶川抗震救灾,玉树抗震救灾,舟曲救灾,上海世博会等等。

从这些实例中看到,"系统"的含义,包括了从简单的事物到复杂的事物,从描述结构、显示过程、确定属性、区分功能,进而到描述纵横关系、层次关系等。

这些系统的形态和性质是大不一样的。系统可以互相包含与被包含,可以互相交叉和融合。每一个人都生活在系统之中,而且是生活在多种多样、互相交叉的系统之中。

1.1.1 系统的概念

"系统"一词最早出现于古希腊德莫克利特写过的《宇宙大系统》一书中,syn-histanai 一词原意是指事物中共性部分和每一事物应占据的位置,也就是部分组成整体的意思。

一般系统论的创始人——20世纪初奥地利生物学家冯·贝塔朗菲(Von Bertalanffy),针对当时机械论的观点与方法,指出"不能只是孤立地研究部分和过程,还必须研究各部分的相互作用,应把生物作为一个整体或系统来考虑",他把"系统"称为"相互作用的多要素的复合体"。如果一个对象集合中存在两个或两个以上的不同要素,所有要素按照其特定方式相互联系在一起,就称该集合为一个系统。其中的要素是指组成系统的不同的最小的(即不需要再细分的)组成部分。

冯·贝塔朗菲

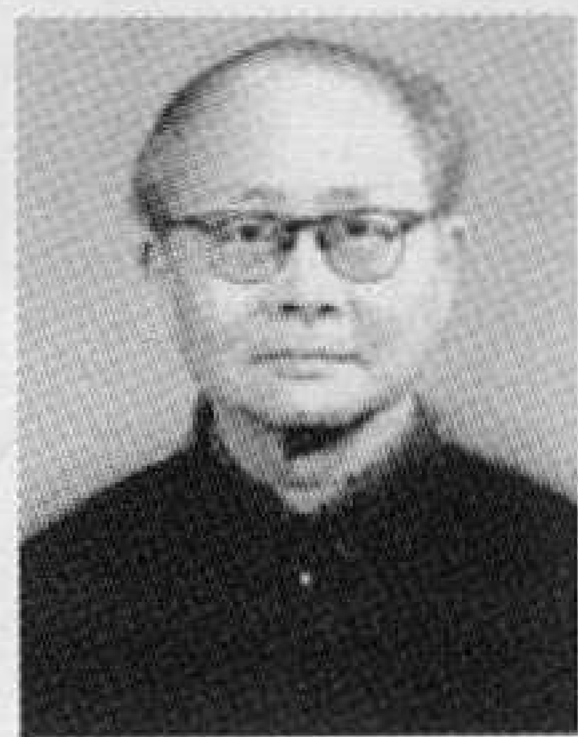
美国的韦伯斯特(Webster)大辞典把"系统"称为"有组织的或被组织化的整体、相联系的整体所形成的各种概念和原理的综合,由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素的集合"。

苏联学者乌约莫夫考察了大量的系统定义后,给出了"系统"的两个等价定义。"任一客体,其中发生某种满足确定性性质的关系,这个客体就是系统"。"任一客体,其中发生某种预先确定的性质的关系,这个客体就是系统"。

在日本的工业标准(JIS)中,认为"系统"是许多组成要素保持有机的秩序,向同一目标移动的东西。

《现代汉语词典》中"系统"的定义如下:①有条理;有顺序:系统知识、系统研究。②同类事物按一定的秩序和内部联系组合而成的整体:循环系统、商业系统、组织系统、系统工程。③由要素组成的有机整体。与要素相互依存相互转化,一系统相对较高一级系统时是一个要素(或子系统),而该要素通常又是较低一级的系统。系统最基本的特性是整体性,其功能是各组成要素在孤立状态时所没有的。它具有结构和功能在涨落作用下的稳定性,具有随环境变化而改变其结构和功能的适应性,以及历时性。④多细胞生物体内由几种器官按一定顺序完成一种或几种生理功能的联合体。如高等动物的呼吸系统,包括鼻、咽、喉、气管、支气管和肺,能进行气体交换[2]。

钱学森给出的"系统"定义是指由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的、具有特定功能的有机整体。这个定义,与类似的许多定义一样,指出了系统的三个基本特征:第一,系统是由若干元素组成的;第二,这些元素相互作用、互相依赖;第三,元素间的相互作用,使系统作为一个整体具有特定的功能[3]。


许国志

许国志等学者在《系统科学》一书中认为:系统具有整体性、多元性、内在相关性。具体表现在:系统是由它的所有组分构成的统一整体,具有整体的结构、整体的特性、整体的状态、整体的行为、整体的功能等;系统是多样性的统一、差异性的统一,存在有差别的多个事物(至少两个),才有可能在一定条件下整合成为一个系统;系统中不存在与其他元素无关的孤立元素,所有元素或组分都按照该系统特有的、足以与其他系统相区别的方式彼此联系在一起,相互依存、相互作用、相互激励、相互补充、相互制约,现实世界不存在没有任何内在相关性的事物群体,凡群体中的事物必定以某种方式相互联系,否则不称其为群体,不存在数学意义上的孤立元[4]。

通过分析总结以上关于"系统"的各种定义,本书认为,自然界、人类社会和人

的思维领域都是由"元素"构成的,"元素"之间客观上存在着某种聚合性;当人们在研究某种属性的问题时,有些"元素"之间的关系比较密切,有些"元素"之间的关系相对比较疏远。关系比较密切的"元素"具有相同的属性,能够按照特定的关系和运行过程聚合起来,成为一个能输出一定功能的"聚合体"。为了研究问题的方便,人们称这个聚合体为"系统"。

组成"系统"的"元素"的相同属性称为系统的属性。"系统"输出的功能称为系统的功能,也称为系统的生命力。"系统"中"元素"之间的特定的关系称为系统的结构。系统运行的过程受系统中某种规则所制约,系统运行过程在外观上表现出的某种状态可以被人们所认识。

一方面可以看到,"系统"是唯物的,强调了"系统"的物质性基础,是客观存在的。另一方面又必须看到,"系统"又是辩证的,强调了"系统"是人们的一种思维形式,是主观意识的表现,是人们认识客观世界的一种普遍模型和通用方法。"系统"的概念是人们在处理客观世界的无限性与人们认识世界的有限性之间的矛盾时的一种方法。

研究"系统"的概念,其目的一是构造一个新的系统,能够提供某种产品或某种服务,这个新的系统称之为目的系统。二是描述已存在的系统,通过考察系统的输入与输出,研究系统的运行状态;通过干预系统的运行,使系统保持人们期望的额定的输出功能,即保持系统的生命力。

系统的属性取决于组成它的"元素"和"元素"间的关系,也就是说,对同样的"元素"建立不同的结构(即确定"元素"间不同的关系),就会有不同的总体属性。因此,从普遍意义上来说,系统的价值称为系统结构的势能。为了提高人造系统的价值,可以从两个方面入手,可以用不同的"元素"组成系统,也可以用"元素"间的不同关系来组成系统。

罗沛霖教授于 1996 年 9 月在为《系统研究》一书所写的"序"中这样来描述"系统":怎样划定一个"系统"? 它应当包含多个个体。系统内个体之间存在着紧密的联系,而这些个体与本系统之外的系统和个体之间所存在的联系,则是显著地松散。系统有大的、小的、极大的、极小的。系统之内可以分成子系统,再分小也是可能的。任何一个个体之内,也可能又是一个系统。因此在观察、对待任何事物时,都必须从系统的角度予以考察,既要考察其内部构成,也要考察个体与整体之间、个体与个体之间的联系,更要考察其与外部的联系。不仅从空域中考察,还要在时域中考察,因为所有的因子、个体和群体以及相互的联系,都不会是一成不变的,必须作动态的考察[5]。

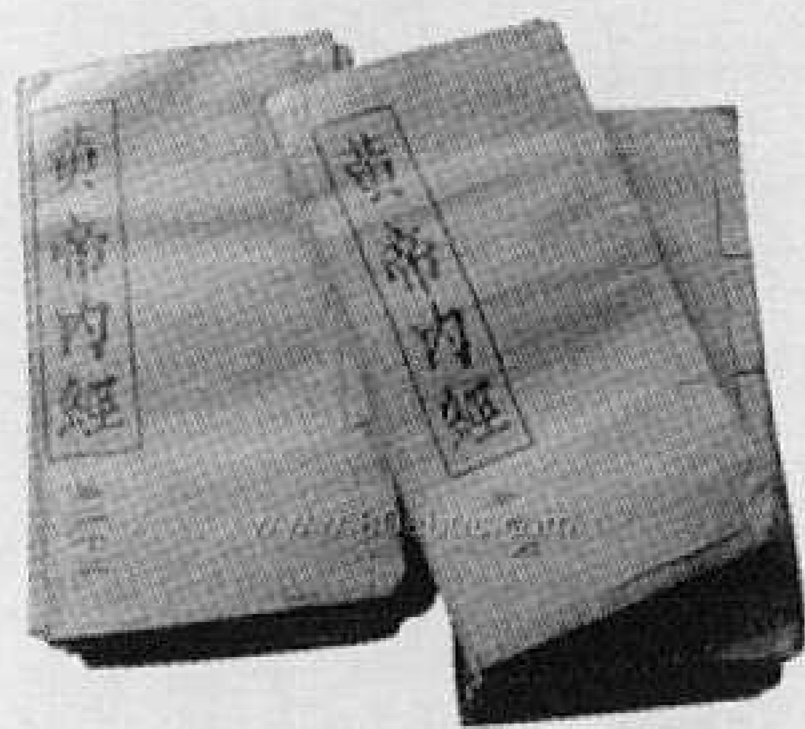
1.1.2 中国古代系统思想

"系统"的概念来源于人类长期的社会实践。人类很早就有了系统思想的萌

芽，主要表现在对整体、组织、结构、等级等概念的认识。我国是一个具有数千年文明史的古国，在丰富的历史宝库中，可以找到很多有关系统的朴素思想。古代天文、军事、工程、医药等方面的知识和成就，都在不同程度上反映了朴素的系统思想，并将这些系统思想运用于社会实践中。下面通过一些事例来看我国系统思想的演变[6-10]。

1. 黄帝内经

我国古代最著名的医学典籍《黄帝内经》，是我国医学宝库中现存成书最早的一部医学典籍。《黄帝内经》是古人运用系统思想研究人体生理和病理现象的典范。《黄帝内经》认为，人体是由各个器官有机联系在一起的整体，一个器官的病变可能影响其他器官或整体，而整体的变化又必然会引发局部病变。因此，它主张从整体角度来研究病理和病因，并应用脏腑学说、经络学说、阴阳五行学说来说明人体的生理功能、病理变化及其相互关系。《黄帝内经》还把人体系统看成是自然界的一部分，认为人的养生规律与自然界的规律密切相关。它提出了“天人相应”的医疗原则，主张把自然现象、生理变化、社会生活、思想情绪等多方面的因素结合起来，从更大的整体范围来研究人体的生理和病理现象。这种整体观念后来发展成为中国传统医学指导临床诊断和治疗的基本原则。其医学理论是建立在我国古代哲学理论的基础之上的，反映了我国古代朴素唯物主义辩证思想，充分体现了系统思想。



黄帝内经

2. 孙子兵法

我国古代的系统思想还反映在军事理论方面。春秋末期著名军事家孙武在他的《孙子兵法》中，阐述了不少朴素的系统思想和谋略。他所阐述的谋略思想和哲学思想，被广泛地运用于军事、政治、经济等各领域中。《孙子兵法》有丰富的系统思想，书中探讨了与战争有关的一系列矛盾的对立和转化，如敌我、主客、众寡、强弱、攻守、胜败、利患等。《孙子兵法》正是在研究这种种矛盾及其转化条件的基础上，提出其战争的战略和战术的。这当中体现的系统思想，在中国系统思维发展史中占有重要地位。

孙武

3. 大禹治水

我国古代人民还将系统思想运用于治水方面，传说在尧帝时期，黄河流域经常发生洪水，为了制止洪水泛滥，保护农业生产，尧帝曾召集部落首领会议，征求治水能手来平息水害。鲧被推荐来负责这项工作。鲧接受任务后，沿用了过去传统的水来土挡的办法治水，也就是用土筑堤，堵塞漏洞的办法。鲧治水九年，劳民伤财，

大禹治水

一事无成,并没有把洪水制服。最后被放逐羽山而死。舜帝继位以后,任用鲧的儿子禹治水。禹总结父亲的治水经验,改鲧"围堵障"为"疏顺导滞"的方法,就是利用水自高向低流的自然趋势,顺地形把壅塞的川流疏通,把洪水引入疏通的河道、洼地或湖泊,然后合通四海,从而平息了水患,使百姓得以从高地迁回平川居住和从事农业生产。后来禹因此而成为夏朝的第一代君王,并被人们称为"神禹"而传颂于后世。

这个故事所体现的系统思想是很明显的。大禹所处理的问题是一个开放的复杂巨系统,有很多种"治水"的方案。大禹在系统分析以后采用了"疏顺导滞"的最优方法,他实现了系统的最佳效能。

4. 都江堰水利工程

都江堰水利工程在四川都江堰市城西,有2200年的历史,是全世界迄今为止,年代最久、唯一留存、以无坝引水为特征的宏大水利工程,如图1.1所示。

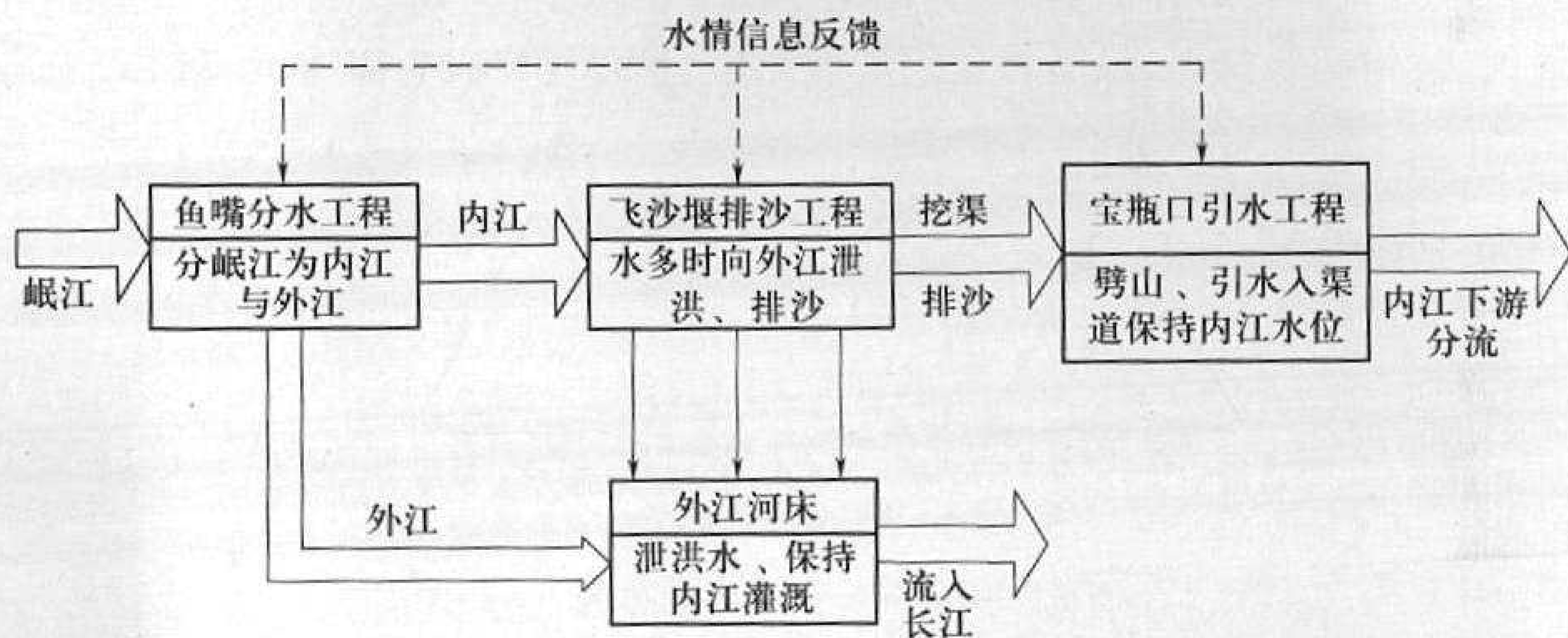


图1.1 都江堰水利工程概况

这项工程主要由鱼嘴分水堤、飞沙堰溢洪道、宝瓶口进水口三大部分和百丈堤、人字堤等附属工程构成,科学地解决了江水自动分流(鱼嘴分水堤四六分水)、自动排沙(鱼嘴分水堤二八分沙)、控制进水流量(宝瓶口与飞沙堰)等问题,消除了水患,使川西平原成为"水旱从人"的"天府之国"。

都江堰水利工程形成了一个协调运转的系统,体现了非常完善的整体观念、优化方法和发展的系统思路,即使从现在的观点看,仍不愧为世界上一项宏伟的水利建设工程。

5. 田忌赛马

战国时期齐国的国王好赛马,常常找手下大将田忌来,与他养的马比赛,比赛分三局,赌金是每局一千两黄金。两个人的马都分上中下三级,当然每一级里面齐

齐王 田忌	上	中	下
上	田输	田赢	田赢
中	田输	田输	田赢
下	田输	田输	田输

田忌赛马

王的马要比田忌的马强一些，比赛的结果往往是田忌连负三局。田忌的谋士孙膑给田忌出了个主意。因为齐王每次都赢，自然骄横，每次都先把马牵出来，而且都是第一局用上马，第二局用中马，第三局用下马。孙膑的主意是用田忌的下马与齐王的上马比赛，用田忌的上马和齐王的中马比赛，最后用田忌的中马和齐王的下马比赛。比赛的结果是田忌输了第一局，赢了第二和第三局，以三局两胜的战果赢得了比赛。

田忌赛马的故事说明在已有的条件下，经过筹划、安排，系统分析各种方案的优劣，选择一个最好的方案，就会取得最好的效果。可见，系统思想是十分重要的，只有这样才能"运筹帷幄之中，决胜千里之外"。

6. 丁谓建宫

"丁谓建宫"，是一个历史典故。简单归纳起来，就是这样一个过程：首先需要大量的土方构筑地基，然后需要大量的石料、木料、砖瓦等建筑材料，最后将大量的建筑垃圾处理掉。具体的操作是：首先挖掘大街取土，大街变成沟，引流汴河水成为运河，运输建筑材料，最后将建筑垃圾充填运河，复修成为街道，如图 1.2 所示。

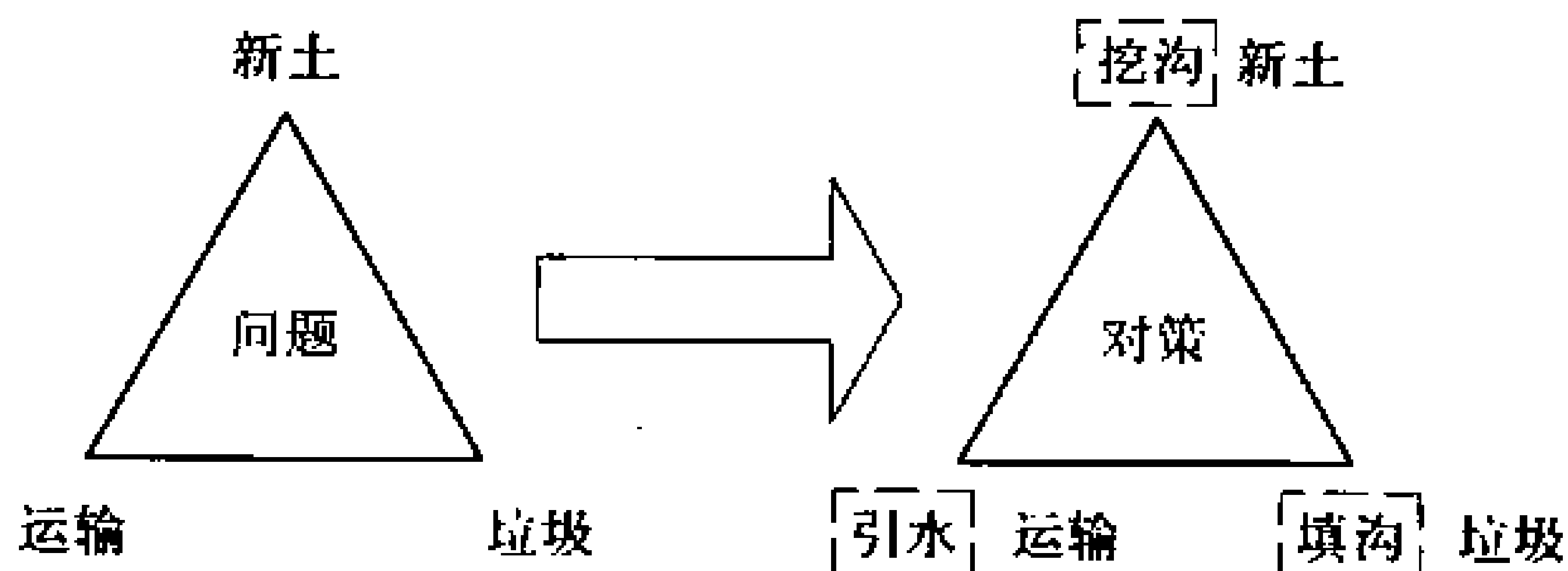


图 1.2 丁谓建宫方案

按照这个施工方案，不仅节约了许多时间和经费，而且使工地秩序井然，使城内的交通和生活秩序不因施工受到太大的影响，确实是科学合理的施工方案。

以上的例子都说明人类在认识系统工程之前，在社会实践中就已经进行辩证的系统思维了，并应用朴素的系统思想改造自然与社会。

朴素的系统思想，不仅体现在古代人类的实践中，而且在我国古代的哲学思想中得到反映。当时的一些朴素唯物主义思想家都从承认统一的物质本源出发，把自然界当做一个统一体。

1.1.3 系统思想的成熟与发展

古代朴素唯物主义哲学思想包含了系统思想的萌芽，它虽然强调对自然界整体性、统一性的认识，但缺乏对整体各个细节的认识能力，因而对整体性和统一性

的认识是不完全的。

15 世纪下半叶，近代科学开始兴起，力学、天文学、物理学、化学、生物学等学科逐渐从古代哲学中分离出来，获得日益迅速的发展。在近代科学技术发展的基础上，到了 19 世纪，系统思想进一步从经验上升为哲学，从思辨进展到定性论述。19 世纪上半期，自然科学取得了伟大的成就，特别是能量转化、细胞和进化论的发现，使人类对自然过程相互联系的认识有了很大提高。

恩格斯说："由于这三大发现和自然科学的其他巨大进步，我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内的过程之间的联系，而且总的来说也指出了各个领域之间的关系了。这样，我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实，以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画[11]。"马克思主义的辩证唯物主义认为，物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程所形成的统一体。辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其统一性的思想，就是系统思想。

社会实践活动的大型化和复杂化，要求系统方法不仅能定性，而且能定量。解决当代社会种种复杂的系统问题，定量要求越来越强烈，这尤其表现在军事活动中，因为战争中决策的成败关系到国家的生死存亡。第二次世界大战是定量化系统思想发展的里程碑。这次战争在方法和手段上的复杂程度较以往的战争有很大增长，交战双方都需要在强调全局观念、从全局出发合理使用局部、最终求得全局效果最佳的目标下，对所拟采取的措施和反措施进行精确的定量研究，才有希望在对策中取胜。这样一种强烈的需要，以极大的力量把一大批有才干的科学家和工程师吸引到拟订与评价战争计划、改进作战技术与军事装备使用方法的研究中，其结果就是定量化系统方法及强有力的计算工具——电子计算机的出现及其成功的运用。

钱学森指出：系统思想和系统方法是进行分析和综合的辩证思维工具，它在辩证唯物主义那里取得了哲学的表达形式，在运筹学和其他系统科学那里取得了定量的表达形式，在系统工程那里获得了丰富的实践内容。系统思想经历了从经验到哲学又到科学，从思辨到定性又到定量的发展过程[12]。

1.1.4 系统特征

明确系统的特性，是人们认识系统、研究系统、掌握系统思想的关键。系统应当具备的特征如下[6-10]。

1. 集合性

集合性表明系统是由许多(至少两个)可以相互区别的要素组成。例如，一个武器系统是一个系统，它的要素集合如图 1.3 所示。

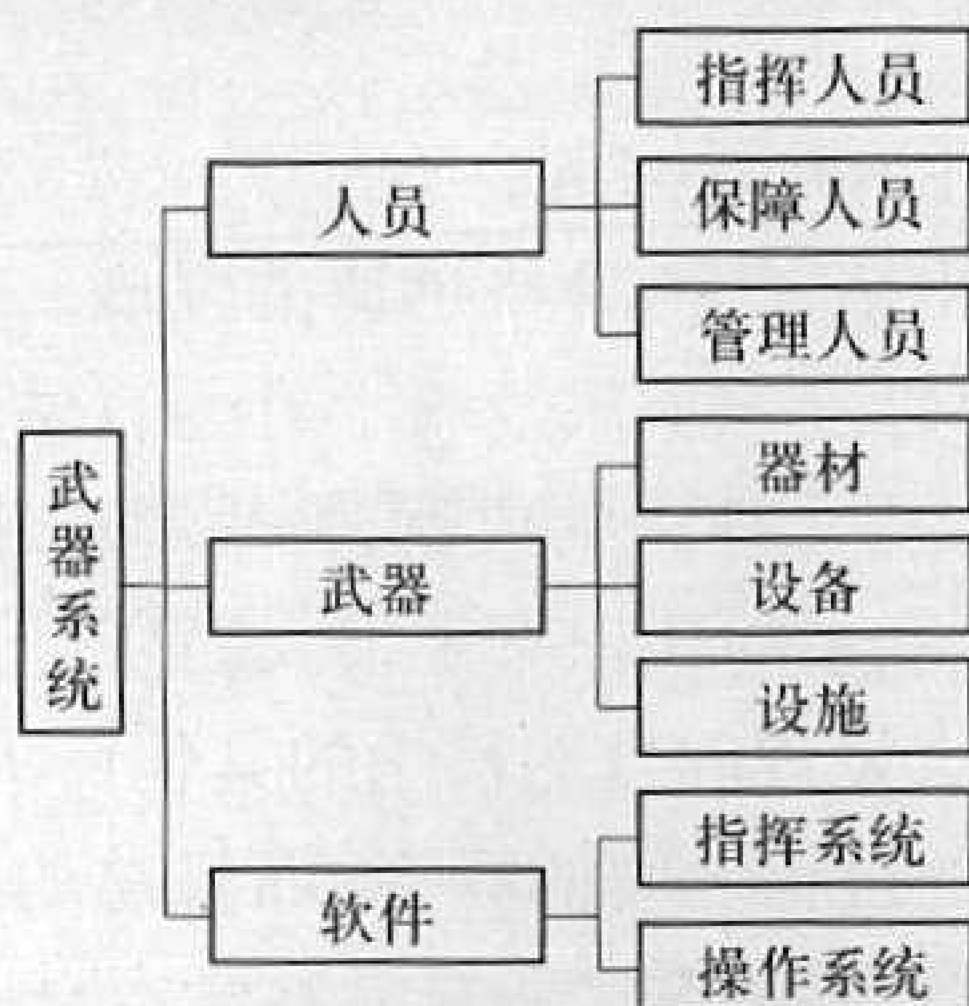


图 1.3　武器系统

2. 整体性

系统的整体性是系统最基本最核心的特性，主要表现为系统的整体功能。系统的整体功能不是各组成要素功能的简单叠加，也不是组成要素的简单拼凑，而是呈现出各组成要素所没有的新功能，可概括地表达为“系统整体不等于其组成部分之和”，而是“整体大于部分之和”。

小故事：拿破仑的系统思维

拿破仑

法国著名的政治家、军事家拿破仑(1769—1821)给人讲述过这样一段故事：历史上曾有A、B两国交战，相互动用了凶猛强悍的骑兵。其中A国骑兵骑术高明，剑法高超，最善于单个格斗，他们的缺点是纪律涣散，配合不佳；B国骑兵虽然骑术并不娴熟，剑法也不甚精湛，然而他们纪律严明，步调一致，行动如一人。这样，尽管单个的B国的骑兵根本不是A国骑士的对手，但如果1000个B国骑兵联合作战，则可以打败1500个A国骑士组成的联队。

这则故事生动地说明了系统科学的整体性原理，即“整体不等于它的局部的总和”。这个意思可形象地表示为 $1+1\neq2$，即局部与局部功能相加，不等于其整体的功能。

整体不等于局部之和，会出现两种情况。

第一种情况是整体小于局部之和，即 $1+1<2$。三个和尚没水吃，就是属于这种情形。

第二种情况是整体大于局部之和，即 $1+1>2$。三个臭皮匠，胜过诸葛亮，是属于这种情形。

由于这种整体功能不是各要素所单独具有的，因此对于各要素来说，这种整体功能的产生就不仅是一种数量上的增加，更表现为一种质变，系统整体的质不

同于各要素的质。例如一个武器系统,由武器、人员和软件所组成,只有各个组成部分相互协作、相互作用,使得各个部分融为一个整体,武器系统的整体功能才能显现。

3. 相关性

相关性是指系统内部的要素与要素之间、要素与系统之间、系统与其环境之间存在着这样那样的联系。联系又称关系,常常是错综复杂的。如果不存在相关性,众多的要素就如同一盘散沙,只是一个集合(set)而不是一个系统(system)。系统中任一要素与存在于该系统中的其他要素是互相关联又互相制约的,它们之间的某一要素如果发生了变化,则其他相关联的要素也要相应地改变和调整,从而保持系统整体的最佳状态。

4. 目的性

由于所研究的对象系统都具有特定的目的,研究一个系统,首先必须明确它作为一个整体或总体所体现的目的与功能。人们正是为了实现一定的目的,才组建或改造某一个系统的。由于复杂系统是具有多目标和多方案的,当组织规划这个错综复杂的大系统时,常采用图解方式来描述目的与目的之间的相互关系,它们分为若干层次,构成一个指标体系。这种图解方式称为目标树,如图1.4 所示。

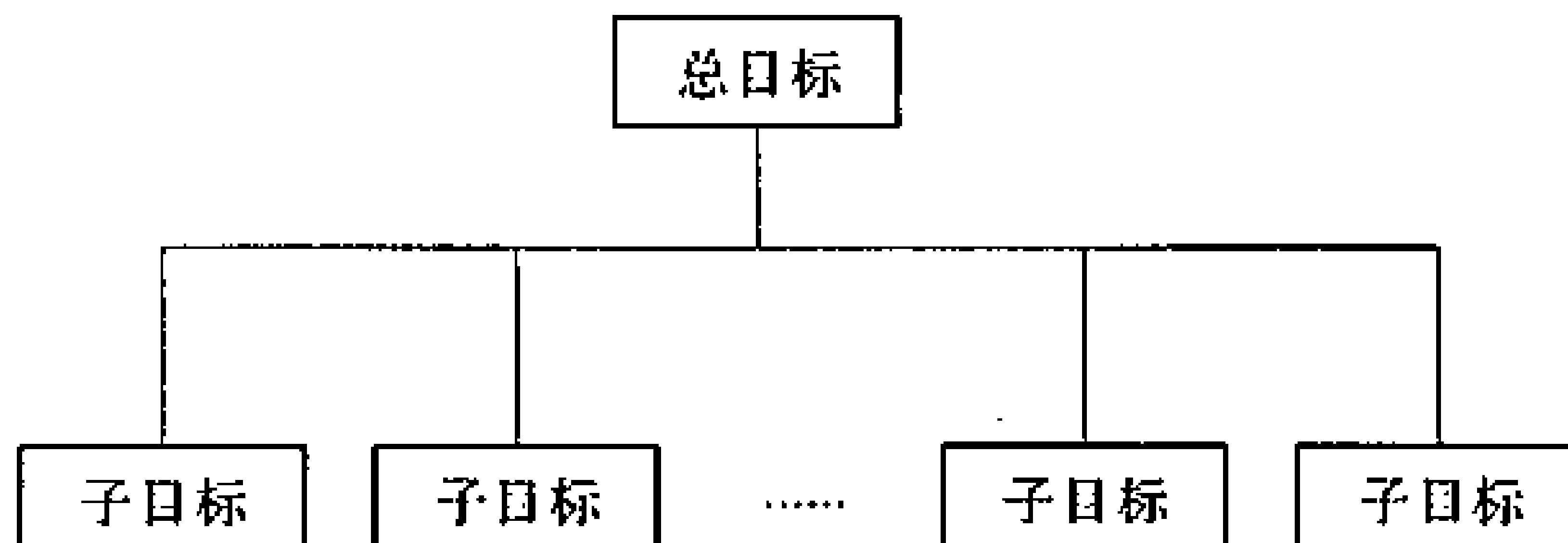


图 1.4　目标树

5. 涌现性

系统的涌现性包括系统整体的涌现性和系统层次间的涌现性。系统的各个部分组成一个整体之后,就会产生出整体具有而各个部分原来没有的某些东西(性质、功能、要素),系统的这种属性称为系统整体的涌现性。系统的层次之间也具有涌现性,即当低层次上的几个部分组成上一层次时,一些新的性质、功能、要素就会涌现出来。例如,战斗机由机身、发动机和机翼组成,这些组成部分不存在飞翔的功能。但是它们组合而成的战斗机就具有飞翔功能,这就是涌现性。

6. 有序性(层次性)

如果系统很大,则可以把它分成几个子系统,各层次之间有着包含与被包含的关系,或者领导与被领导的关系。例如,军队包含军—师—旅—团—营—连—排。

7. 成长性

任何系统都是从无到有，从小到大，经历孕育期、发展期、成熟期、衰老和更新期。例如，一套武器系统，经历了发展论证—演示实验—科研试验—采购订货—装备部队—使用保障等寿命阶段以后，就面临着退出系统，有的可能通过更新改造，继续回到原来的系统，有的可能通过再制造，进入新的系统。其典型的成长曲线如图 1.5 所示。

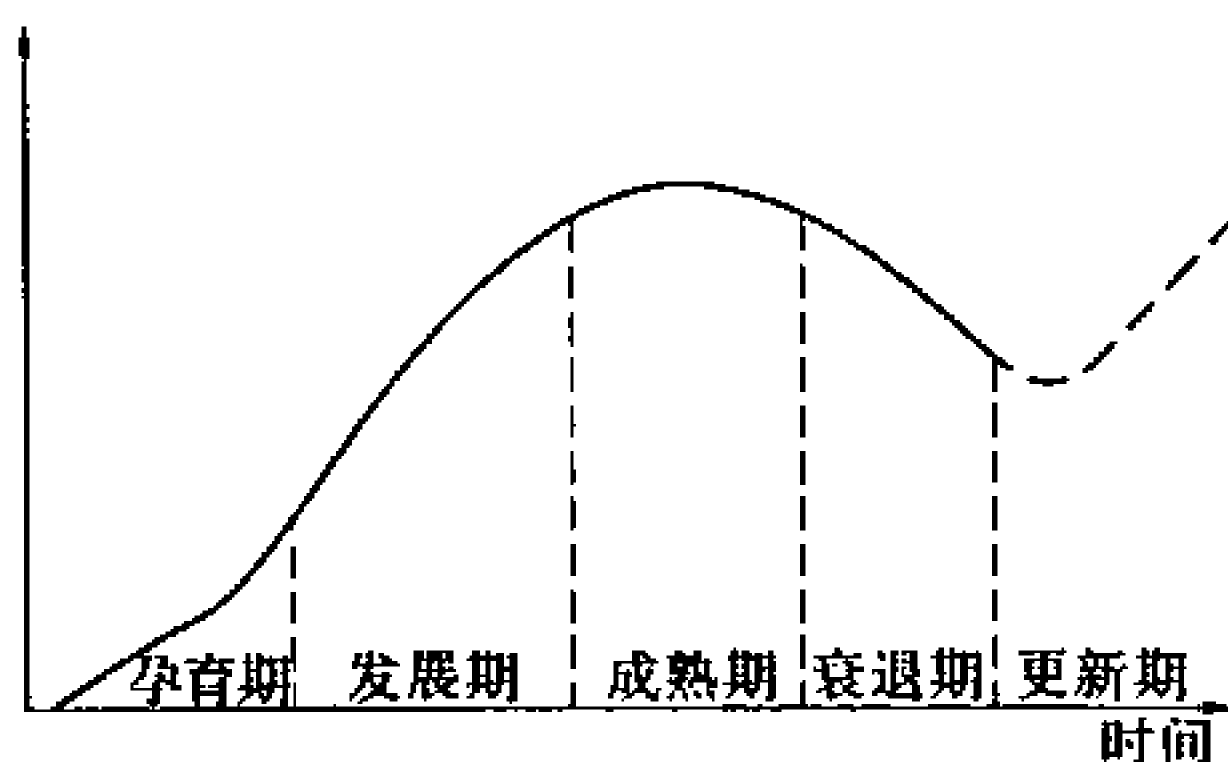


图 1.5 系统成长性

了解系统的成长性，有助于人们认识系统的发展规律，分析系统所处的阶段，采取相应的策略。

8. 环境适应性

环境是指存在于系统以外事物（物质、能量、信息）的总称，也可以说系统的所有外部事物就是环境，如图 1.6 所示。所以，系统时刻处于环境之中，环境是一种更高级的、更复杂的系统，在某些情况下它会限制系统功能的发挥。

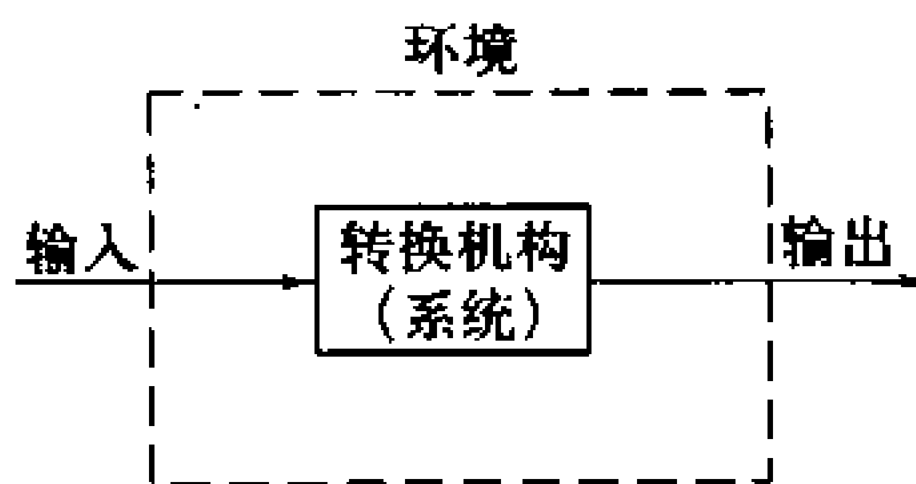


图 1.6 系统环境适应性

环境的变化对系统有很大的影响，系统与环境是相互依存的，系统必然要与外部环境产生物质的、能量的和信息的交换，因此，系统必须与时俱进，适应外部环境的变化。能够经常与外部环境保持最佳适应状态的系统才是理想的系统，不能适应环境变化的系统是难以存在的。

环境适应性特征，就是说不仅要注意系统内各要素之间相关性的调节，而且要考虑系统与环境的关系，只有系统内部关系和外部关系相互协调、统一，才能全面地发挥出系统的整体功能，保证系统整体向最优化方向发展。

所有系统特性之间的关系如图 1.7 所示。

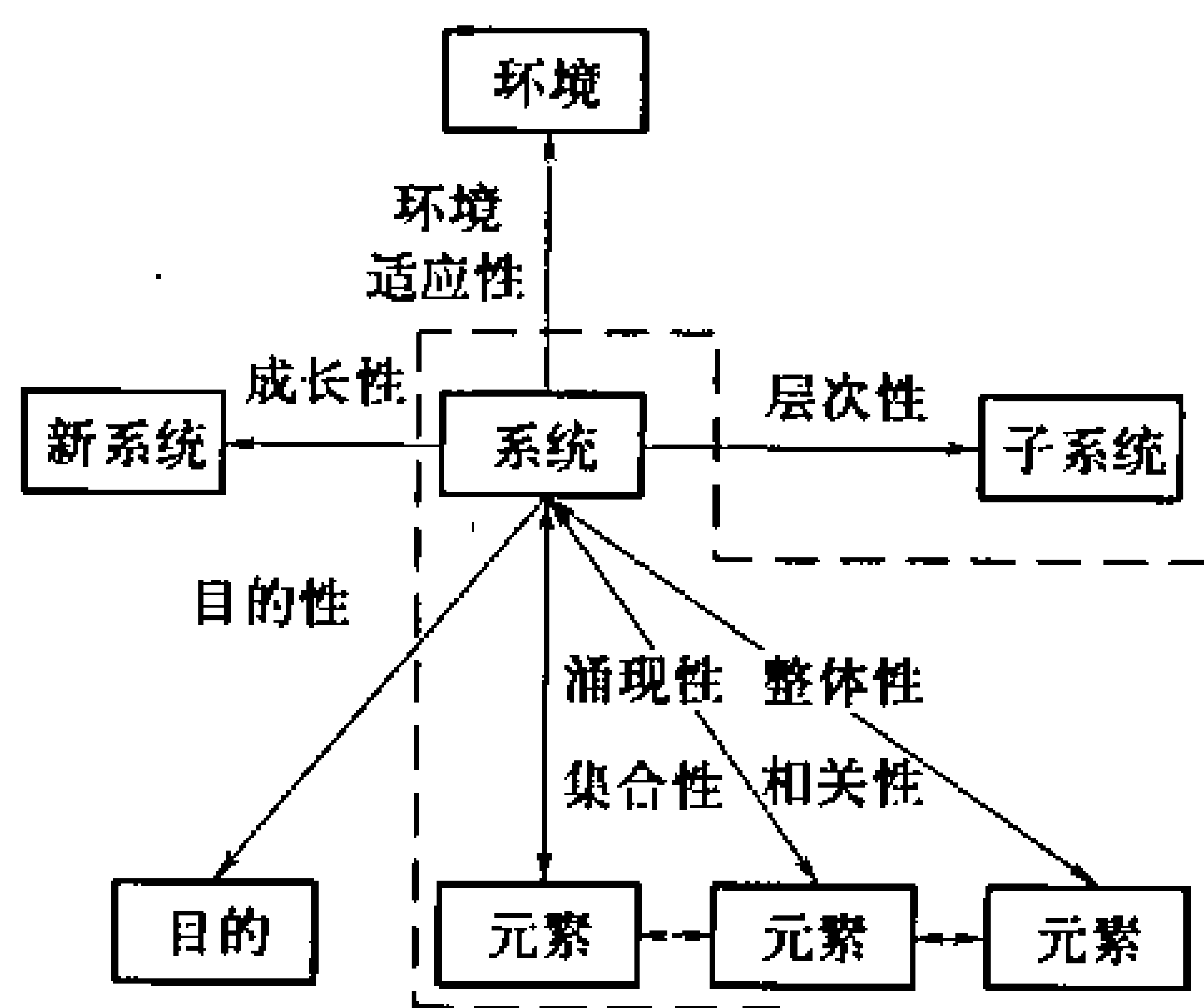


图 1.7　系统各特征的关系

1.1.5　系统分类

人们为了研究的方便，有时需要对系统进行分类，系统分类的方法有多种。

1. 按照自然属性分类

按照系统的起源，可将系统划分为自然系统与人工系统。由自然物组成的系统称为自然系统。例如，太阳系、银河系、生态系统、海洋系统、气象系统、矿藏系统等。由人工制造的各种要素组成的系统称为人工系统。例如，各种工程技术系统，人造卫星、运载火箭等。人工系统都是存在于自然系统之中的，两者相互影响和渗透。

2. 按物质属性分类

按组成系统的要素存在的形态划分，可以将系统划分为实体系统和概念系统。凡是由物质、机械、生物、仪表、动力和人力等有形事物组成的系统称为实体系统。凡是由概念、原则、政策、方法、制度、程序等概念性的非物质实体所构成的系统称为概念系统。

近年来，概念系统又被称为软科学系统，并日益受到重视。导弹系统、通信卫星系统是实体系统；信息系统、情报系统是概念系统。在实际生活中，实体系统和概念系统在多数情况下是结合的，实体系统是概念系统的物质基础，而概念系统往往是实体系统的中枢神经，指导着实体系统的行为。如军事指挥系统中既包括军事指挥员的思想、信息、原则、命令等概念系统，也包括计算机、通信设备等实体系统。

3. 按运动属性分类

按系统与时间的依赖关系划分，可以将系统划分为静态系统和动态系统。当一个系统的状态不随时间而变化时，这种系统称为静态系统。当一个系统的状态是时间的函数，即随着时间而发生各种变化时，这种系统称为动态系统。实际上，静态系统只是动态系统的一种特例，或者是对真实系统的一种简化和抽象。

4. 按系统与环境间的关系分类

按系统与环境间的关系可将系统分为开放系统与封闭系统。开放系统是指系统与其环境之间有物质、能量或信息交换的系统，如图1.8所示。开放系统还可以进一步区分为：只有能量交换的系统，同时进行物质能量交换的系统，物质能量信息开放的系统，等等。开放系统是客观物质世界中最普遍存在的系统，在环境发生变化时，开放系统通过系统中要素与环境的交互作用以及系统本身的调节作用，使系统达到某一稳定状态。因此，开放系统常是自调整或自适应的系统。

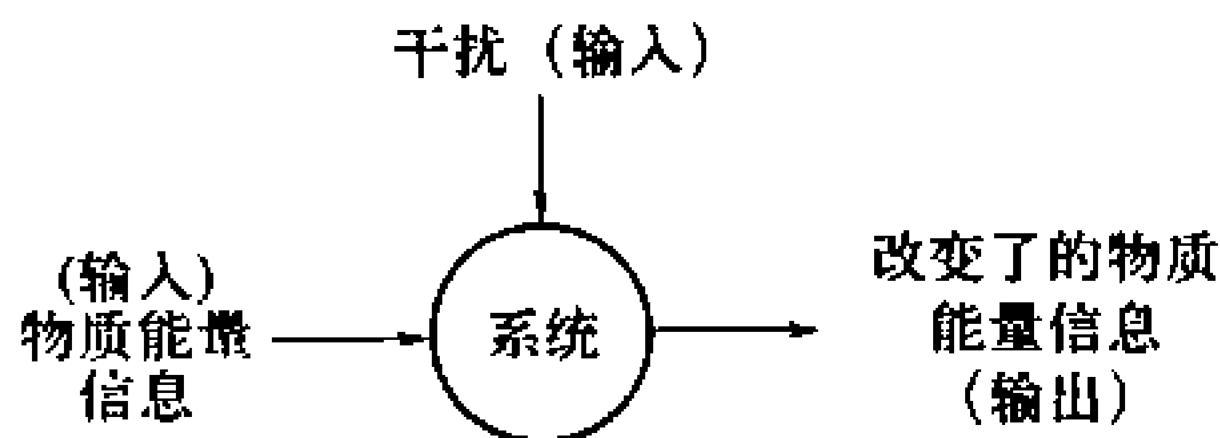


图1.8 开放系统

封闭系统是一个与外界之间没有物质能量和信息交换的系统。环境仅仅为系统提供了一个边界，不管外部环境有什么变化，封闭系统仍表现为其内部稳定的均衡特性，严格地说，这种系统是不存在的，它只是一种简约的、理想化的系统模型。

开放系统是动态的“活的”系统，封闭系统是僵化的“死的”系统。系统由封闭走向开放，就可以增强活力，焕发青春。

5. 按反馈属性分类

按反馈属性可分为开环系统与闭环系统，在开放系统中，系统的输出反过来影响系统输入的现象，称为“反馈”。增强原输入作用的反馈称为“正反馈”；削弱原输入作用的反馈称为“负反馈”。“负反馈”使得系统行为收敛，“正反馈”使得系统行为发散。通常讲的“良性循环”与“恶性循环”，实际上都是“正反馈”作用的表现。没有“反馈”的系统为开环系统；具有“反馈”的系统为闭环系统。系统的“反馈”主要是信息“反馈”。一般来说，“反馈”是指“负反馈”。

开环系统如图1.9所示。

图1.9 开环系统

闭环系统如图1.10所示。

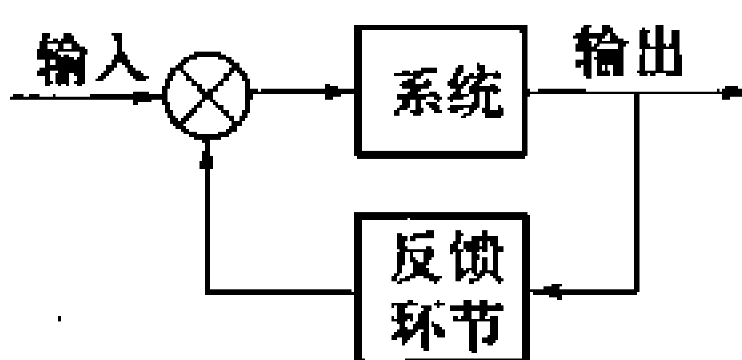


图1.10 闭环系统

6. **按照系统的综合复杂程度分类**

薛华成教授指出:从系统的综合复杂程度方面考虑,可以把系统分为三类九等[13],如图 1.11 所示。

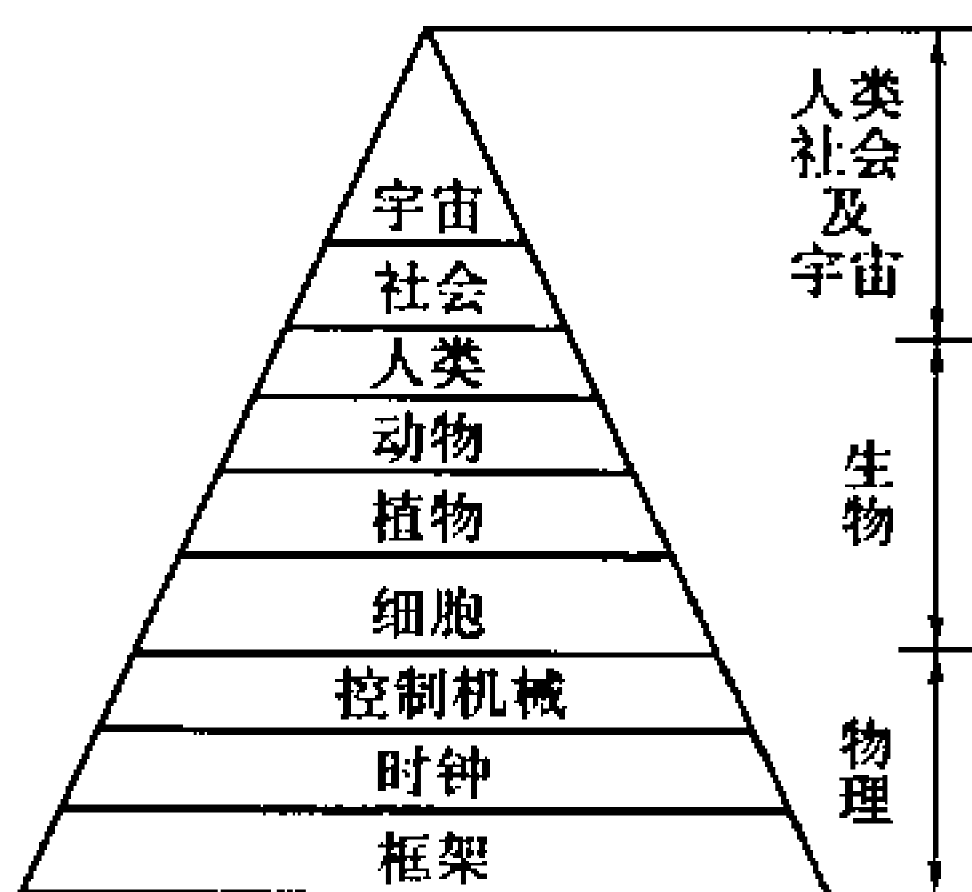


图 1.11　系统分类

(1) 框架。这是最简单的系统,如桥梁、房子,其目的是交通和居住,其部件是桥墩、桥梁、墙、窗户等,这些部件有机地结合起来提供服务。它们是静态系统,虽然从微观上说它们也在动。

(2) 时钟。它按预定的规律变化,什么时候到达什么位置是完全确定的,虽动犹静。

(3) 控制机械。它能自动调整,如把温度控制在某个上下限内或者控制物体沿着某种轨道运行。当因为偶然的干扰使运动偏离预定要求时,系统能自动调节回去。

(4) 细胞。它能新陈代谢和自繁殖,它有生命,是比物理系统更高级的系统。

(5) 植物。这是细胞群体组成的系统,它显示了单个细胞所没有的作用,它是比细胞复杂的系统,但其复杂性比不上动物。

(6) 动物。动物的特征是可动性。它有寻找食物、寻找目标的能力,它对外界是敏感的。它也有学习的能力。

(7) 人类。人有较强的存储信息的能力,说明目标和使用语言均超过动物,人还能懂得知识和善于学习。人类系统还指人作为群体的系统。

(8) 社会。这是人类政治、经济活动等上层建筑的系统。社会系统就是组织。

(9) 宇宙。这不仅包括地球以外的天体,而且包括一切我们现在还不知道的东西。

这里底层三个是物理系统,中间三个是生物系统,最高层三个是最复杂的系统。管理系统属于社会系统,是最复杂的系统之一。要想用计算机有效地解决现代管理问题,计算机的容量还需要提高几个数量级。

7. **钱学森的系统分类**[14-17]

钱学森于 1981 年构造设计出的现代科学体系如图 1.12 所示。

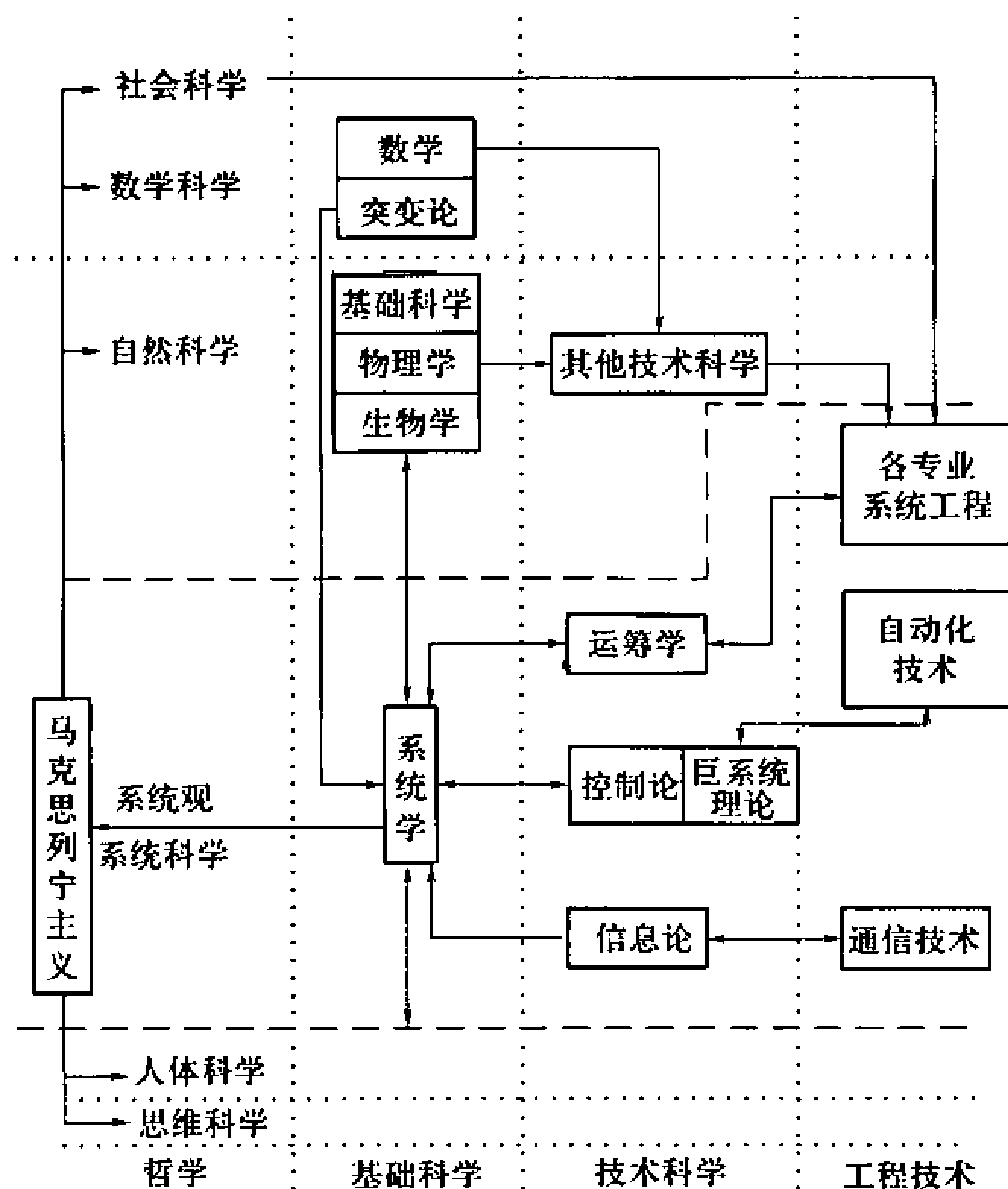


图 1.12　系统科学体系

按照钱学森的构想,现代科学技术体系纵向可分为四个层次:哲学、基础科学、技术科学和工程技术。横向可由社会科学、数学科学、自然科学、系统科学、人体科学和思维科学组成。系统科学是在自然科学、社会科学和数学科学之外正在形成的一个新的学科体系。

钱学森对系统提出如下分类:①按照系统规模可以分为小系统(little system)、大系统(large scale system)、巨系统(giant system);②按照系统结构的复杂程度可以分为简单系统(simple system)和复杂系统(complex system)。把两个标准结合起来进行分类,形成一种新的完备分类,如图 1.13 所示。

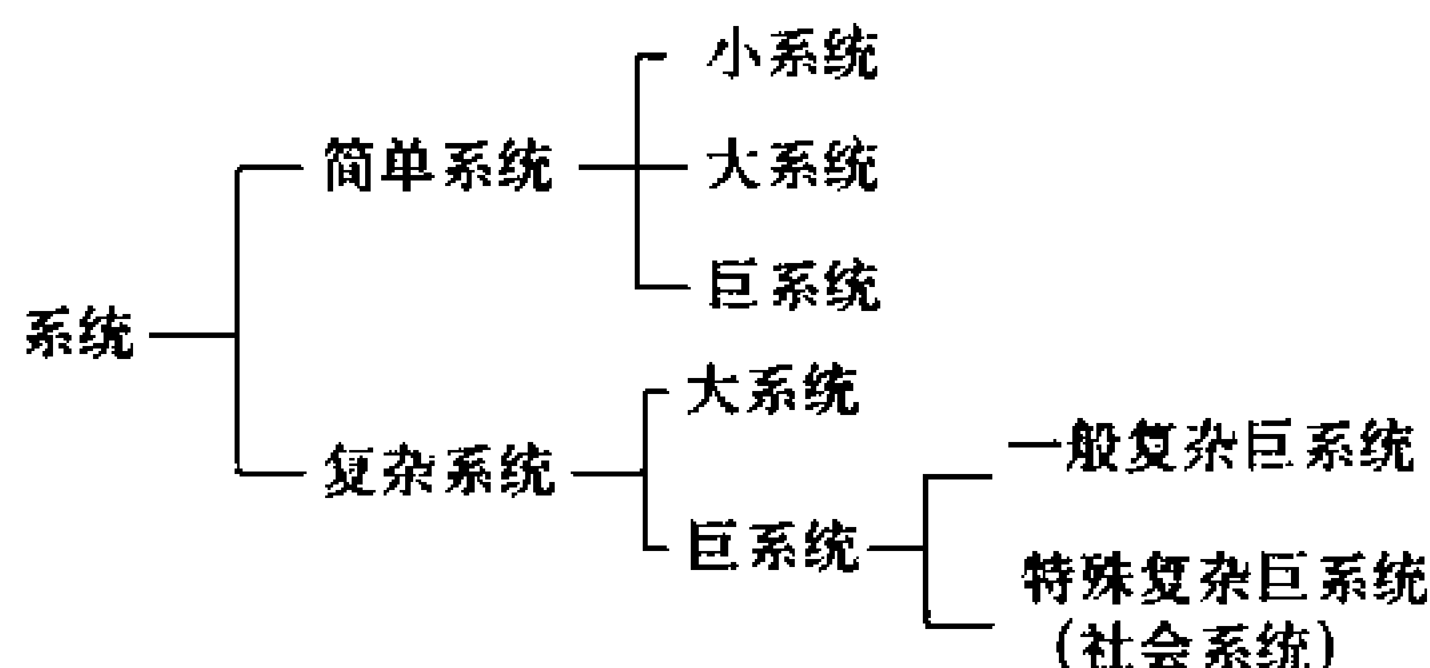


图 1.13　钱学森对系统的分类

钱学森还很重视系统的开放性，倡导研究开放的复杂巨系统（open giant complex system）。国际互联网也是开放的复杂巨系统。实际上，钱学森提供了研究系统分类的一个三维坐标系，如图1.14所示。复杂系统有巨系统，也有小一些的系统，但是，系统工程研究的重点是大系统、巨系统，尤其是开放的复杂巨系统。

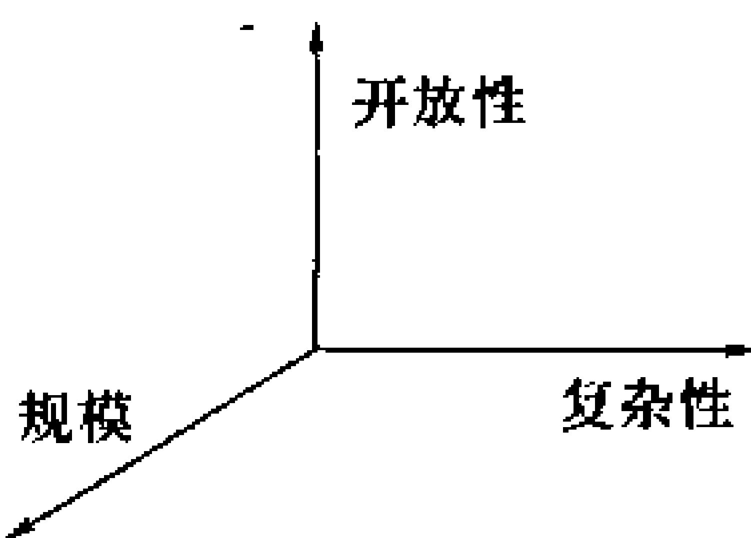


图1.14 系统分类的三维坐标系

1.2 系统工程概述

1.2.1 系统工程的发展简史

系统工程在国外的发展，经历了若干个阶段，见表1.1。

表1.1 系统工程发展简史

年代	重大的实践和事件	重要理论和方法贡献
1930年	美国发展与研究广播电视系统	提出系统方法的概念
1940年	美国实施彩电开发计划	采用系统方法
	美国贝尔电话公司开发通信系统	正式使用系统工程一词
第二次世界大战期间	英国、美国的军事行动	产生军事运筹学，军事系统工程
20世纪40年代	美国研制原子弹的“曼哈顿计划”	运用系统工程，并推动了其发展
1946年	美国建立兰德公司	提出系统分析概念
40年代后期到50年代初	运筹学的广泛运用与发展、控制论的创新与应用、计算机的出现	
1957年	H.古德（H. Goode）和R.马乔尔（R. Machol）发表一部《系统工程学》	系统工程形成的标志
1958年	美国研制“北极星”导弹潜艇	提出网络优化技术（PERT）
1965年	R.马乔尔编著《系统工程手册》	表明系统工程的实用化和规范化
1961年—1972年	美国实施“阿波罗”登月计划	多种系统方法的提出
1972年	国际应用系统分析研究所成立	系统工程应用到工程和社会领域
20世纪70年代	系统工程广泛应用	
20世纪80年代至今	系统工程快速发展，百家争鸣	

从冯·贝塔朗菲的系统论开始，在将近半个世纪的时间内，系统工程获得了飞速的发展。下面我们分几个时期加以论述[6-10]。

1. 萌芽时期（20世纪初—40年代初）

第一次世界大战期间，出现了应用于军事的军事运筹学雏型。以后美国的

"管理之父"泰勒在20世纪初创造了科学的管理方法体系。第一次提出"系统工程"这一名词的是1940年在美国贝尔电话公司实验室工作的莫利纳(Molina)和在丹麦哥本哈根电话公司工作的厄朗(Erlang),他们在研制电话自动交换机时,意识到不能只注意电话机和交换台设备技术的研究,还要从通信网络的总体上进行研究。他们把研制工作分为规划、研究、开发、应用和通用工程等五个阶段,以后又提出了排队论原理,并应用到电话通信网络系统中,推动了电话事业的飞速发展。同一时代,美国RCA公司在彩色电视的开发中已经运用到了系统探索法。

2. 形成时期(第二次世界大战—50年代中期)

第二次世界大战期间,军事运筹学获得了高速发展。首先由英国应用于制定作战计划,如解决护航舰队的编制,防空雷达的配置与使用,提高反潜艇的作战效果以及民防等问题,广泛地应用了整数规划、排队论、博弈论等方法。战后,这种理论被迅速地应用于经济管理部门,成为制定政策的工具。1946年美国兰德公司成立,并致力于研究复杂系统的数学分析方法及各种咨询方法,取得很多成果。接着美国的国防系统和航天、通信、交通等部门对系统的开发盛行起来,同时在电力、通信、交通等都有了大系统的新型设计法,为现代"系统工程"研究奠定了基础。

1950年美国麻省理工学院试验了"系统工程"的教育;1954年开设了工程分析的课程,培养学生运用系统工程的基本理论和数学方法,创造性地解决问题;1956年美国杂志上已经有关于系统工程的论文;1957年美国的H. 古德(H. Goode)和R. 马乔尔(R. Machol)两位教授,出版了第一本被正式命名的《系统工程学》著作,从此,系统工程就作为专业术语沿用下来。

3. 蓬勃发展时期(50年代中期—70年代)

在40年代末和50年代初期相继出现的信息论、控制论和运筹学、电子计算机为系统工程的蓬勃发展提供了基础。1958年美国在"北极星"导弹的研制中,采用了计划评审技术(PERT),从而把系统工程学引进到管理领域。

由于计算机手段和方法论的限制,系统工程这门新兴学科在很长一段时间内没有受到人们的普遍重视,计算机的出现(1946年)和普及(20世纪60年代)、现代控制论理论的发展为系统工程提供了强有力的运算工具和信息处理手段。1965年美国学者R. 马乔尔编写了一本命名为《系统工程学手册》的专著,其中包括了系统工程的方法论、系统环境、系统元件、系统理论、系统技术、系统数学等,该书的出版,使系统工程成为一个比较完整的体系。20世纪70年代初,"阿波罗"号宇宙飞船登月计划的成功,是系统工程学应用于航天系统极其成功的一例。与此同时,日本从美国引进了系统工程方面的大量资料及技术,并把它们应用于质量管理和其他方面,取得了显著的效果。此外,美国、苏联、西欧各国也都在大学开设了系统工程的专业,培养系统工程的专业人才。其间出现的学科分支见表1.2。

表 1.2　20 世纪 40 年代—70 年代出现的部分横向联系的学科分支

创始人	分支学科名称	出现时间/年	创始人	分支学科名称	出现时间/年
冯·诺依曼	对策论	1944	W·R·阿什布	自组织系统原理	1962
冯·贝塔朗菲	一般系统论	1945	R·罗森	自复制自动化	1962
CE·香农	信息论	1948	L·扎德	模糊集与系统	1965
N·维纳	控制论	1948	I·普利果金	耗散结构理论	1969
冯·贝塔朗菲	开放系统理论	1949	艾根	超循环理论	1970
钱学森	工程控制论	1954	J·G·米勒	生命系统理论	1972
A·H·哥德	系统工程	1957	汤姆	突变理论	1972
R·别尔曼	动态规划论	1957	P·齐格勒	建模与仿真理论	1972
M·D·曼萨诺维	一般系统的数学理论	1961	H·哈肯	协同学	1977

4. 成熟时期

20 世纪 70 年代以后，系统工程的理论与方法日趋成熟，其应用领域也不断扩大，其重大进展表现三方面：

（1）以自然科学和数学的最新成果为依托，出现了一系列的基础系统理论，为系统工程提供了知识准备。

（2）围绕环境、能源、人口、粮食、社会等世界性危机开展了一系列重大交叉课题研究，使得系统研究与人类社会各方面紧密联系起来。

（3）系统科学体系有了重大的发展，系统科学开始从分立状态向整合方向发展。

系统工程在中国的发展，也经历了若干个阶段。

20 世纪 50 年代—60 年代，中国的一些研究机构和著名学者为系统工程的研究与应用做了理论上的探讨、应用上的尝试和技术方法上的准备。早在 1956 年，中国科学院力学研究所就建立了我国第一个运筹学研究小组，1960 年成立了运筹学研究室。我国已故著名科学家华罗庚教授从 60 年代初期就在我国推广“统筹学”、“优选法”，并取得了显著的成就。与此同时，1955 年秋回国的著名科学家钱学森积极倡导，在军事系统中成立了总体设计部，把技术与管理、设计与使用结合起来，并在导弹研制、人造地球卫星、航天武器等庞大而复杂的工程项目系统中进行了尝试，也取得了巨大的成就。这一时期的主要标志和集中代表是钱学森的《工程控制论》、华罗庚的《统筹法》和许国志的《运筹学》[18]。

中国大规模地研究与应用系统工程是从 20 世纪 70 年代末、80 年代初开始的。1978 年 9 月 27 日，钱学森、许国志、王寿云在《文汇报》发表题为“组织管理的技术——系统工程”的长篇文章；1979 年 10 月，中国科学院、教育部、中国社会科

学院、各个机械工业部以及解放军总参谋部、总后勤部、军事科学院、军事学院、国防科委和各军兵种的150名代表,在北京举行了系统工程学术讨论会。会上,钱学森、关肇直等21名科学家联合向中国科学技术协会倡议成立中国系统工程学会。钱学森在这次会上做了《大力发展系统工程,尽早建立系统科学的体系》的重要报告,这个报告提出了我国发展系统工程的基本途径。20多年来,中国系统工程学会先后组建了20多个专业委员会,也陆续成立了省级系统工程学会,湖南省系统工程学会是全国最早成立的省级系统工程学会。

进入21世纪以来,系统工程的发展及应用出现了许多新的特点,主要有:

(1) 研究的对象系统规模越来越大,并继续朝着"复杂巨系统"发展。

(2) 各类专门系统工程日益形成自己的特色,如特有的模型体系等。

(3) 系统工程与计算机系统的结合变得异常紧密,如政策模拟实验室的开发与建立等。

(4) 系统工程方法论有新的发展,哲学基础更加牢固,定性定量结合更加紧密。

1.2.2 系统工程观念

系统工程观念主要包括以下一些基本思想[19-21]。

1. 用系统的方法研究系统性问题

从系统的观点来看,开发一项工程,就是把工程实体看作一个系统,也把与它有关的外界环境看作一个系统,研究和建立它们之间的恰当关系,以达到工程开发的总目标。这样一来,实际上我们把系统工程研究也看作是一个系统,它包括目的工程系统、环境系统、过程系统等三个基本组成部分。通过研究、规划设计和实验、评定这三个系统内部的结构和关系,使这三个系统相互协调和融合一致,这就是"整体性"概念在系统工程中的确切含义。简言之,就是用系统的方法研究系统性问题。

目的工程系统,即产生预期效能的实体系统,它可能是一件新型武器装备,一项大的水利工程,一项新的政策,等等。环境系统包括与目的工程系统开发有关的各种外界因素,如各种资源,技术知识,地理地质条件,气象条件,有关的社会经济状况、文化教育状况、政治状况,等等。过程系统既包括目的工程所经历的各个阶段,可以简单概括为开发、建造、运用、退出等四个阶段;又包括在目的工程所经历的各个阶段上,处理与协调工程技术活动与环境因素之间的原则和方法。过程系统是系统工程中最复杂最积极的组成部分,有时将过程系统就称为系统工程。

从过程系统研究观点来看,系统工程要综合研究两个并行的基本过程:一个是运用自然规律的工程技术过程,另一个是对工程技术过程的控制过程。从某种意义上来说,工程技术相当于广义的工程硬件,而系统工程相当于广义的工程软件。

正是在这个意义上，人们把系统工程划归为管理科学、软科学。

2. 用社会价值观念研究工程的开发

现代大型工程极为复杂与庞大，涉及社会各界多方面的利益，并将产生多种效能和影响，因此，社会价值观念成了工程开发的前提。社会价值观念涉及以下内容：

(1) 国家利益、国家总目标、政策、法律、社会的稳定与发展等；

(2) 社会经济效益(直接的、间接的、潜在的)；

(3) 社会经济承受能力(投资和市场等)；

(4) 技术能力、技术储备、技术进步、技术环境等；

(5) 资源的利用和保护等；

(6) 环境保护等；

(7) 文化的协调和冲突等；

(8) 社会成员的人身安全、健康与卫生等。

3. 综合观念

因为系统开发活动没有直接的样本可循，它的主要问题是建立系统概念，揭示系统组成元素之间的纵横交错的关系，以及系统与外界环境之间联系，这就首先要有观念上的综合，才能把解决问题的全部过程展开。

综合是创造，是创造性的复杂的思维过程，是运用各种知识和实际经验创造新概念的活动。综合有两种：一种是技术上的综合，例如将掩体、车辆、火炮综合产生坦克；将制导系统与飞行器综合产生导弹；将无线电导航设备和人造卫星综合产生空间导航系统；现代工程更普遍地称之为“技术综合体”。另一种是工程系统与环境之间的综合，也可以说成是工程技术与人类社会、自然环境的综合。这样的综合主要表现在价值评定、把握机遇、对付竞争、制订政策策略，以及人类社会与自然界的和谐相处等方面。与技术上的综合相比，这是一种更重要的综合，因为这方面的活动直接关系到总目标的确定。

4. 策略程序

策略程序是体现和保证系统工程活动自身的整体性或系统性的一个重要观念，它包括行动程序和价值开发程序两个主要内容。

行动程序一般由计划立案、系统开发、工程规划、建造、运用、退出等主要行动阶段构成。由于这些活动每依次前进一步，所投入的人力、物力、财力就要大大增加，如不预先统一规划好，就有可能招致重大损失。最典型的反例就是所谓的“边勘探、边设计、边施工”的做法。

价值开发程序是由一系列体现工程的系统开发思想的价值开发策略所组成的。从根本意义上讲，系统工程观念的整体就是价值开发的总程序。需要特别强调的有以下几点：

(1) 潜在的价值开发；
(2) 多途径发展；
(3) 潜在的危害分析；
(4) 通用化、标准化、系统化；
(5) 危险环境，危害及对策；
(6) 价值评定；
(7) 技术的转移和创新。

以上这些都是为提高收益、效能、价值和避免出现重大错误或忽视的关键事项，对其中每一个概念的探讨都极为重要。从一定意义上来讲，系统工程研究的目的就在于拟订一套关于技术开发、组织管理、工程实施、工程运用、促进人类社会和谐、保护生态环境等有关活动的策略，以保证工程发展在整体上有最好的价值。

5. 价值和时间

价值观念是系统工程观念的一个基本组成部分，评定和决策就建立在价值观念的基础上。由于系统工程的任务是解决工程发展中的社会性问题，因而在系统工程中确定价值问题是相当困难的，主要原因是：

①无样本性；②社会各界对同一个问题有各种不同的价值取向；③所涉及的因素有些是不可度量的，不确定的，不分明的。

特别注意，价值和时间有着紧密的联系。同一个因素在不同的时间里可能有不同的价值，当人们依据当前的条件从事工程开发活动时，要估计到开发的工程在今后一定时间内的价值。因此，关于决策与预测的研究成为系统工程中的两个重要课题。

决策活动的主要内容是确立整系统的目标集（诸如效能、费用、可靠性、时间性、适应性等），辨识各目标因素的价值，确定目标因素的价值与整系统价值的关系，并求出整系统的价值，只有这样才能进一步对各种方案进行比较或评定。在工程开发的辨识阶段，由于前面所说的三个原因，求解过程不同于处理那些环境已经设定的问题的求解方法（诸如工程计算、优化技术等），而应该有人的活动介入；必须由具有丰富工作经验和善于处理事务的专家分别给出各种价值因素在计算中的地位，并不断调整它们的地位。

预测活动也是如此，对于开发性工程来说，预测活动也具有同样特征，它们的这些特征是由系统工程所担负的任务所决定的。

价值和时间的观念是系统工程人员时时刻刻需要牢固掌握的一个观念，也可以说是行动的准则。

6. 开发创造力

系统工程学科是一门社会—技术学科，从现实意义上来看，每一项系统工程都是一项崭新的课题；因此，每一项系统工程研究必须是一个创造性成果。在整个系

统开发过程中,人的创造力是最重要的,然而又是最不确定的因素。如前所述,在系统工程领域内所强调的创造力,不是指新的科学定理、定律的发现,新技术的发明,等等,而是建立所开发系统的概念、系统的组态(即构成和作用原理)以及组织管理和规划等一些新概念。一个概念形成以后,对多数人来说开始可能很普通,但是在它未被创造出来之前却不为人们所关注。

7. 整体化、综合化、科学化

从系统工程整个活动的观点来看,系统工程观念可以归结为思想方法上的整体化、资源利用的综合化、组织管理的科学化。

1.2.3 系统工程概念

系统工程在系统科学体系结构中属于应用层次,是一门正处于快速发展的跨越许多学科的科学。由于它与其他学科的相互渗透、相互影响,不同专业领域的人对它的理解不尽相同,至今仍无统一的定义。下面列举国内外学术和工程界对系统工程的一些定义[6-10]:

(1)《中国大百科全书·自动控制与系统工程卷》指出:"系统工程是从整体出发合理开发、设计、实施和运用系统的工程技术。它是系统科学中直接改造世界的工程技术[22]。"

(2) 日本学者三浦武雄指出:"系统工程与其他工程学不同之处在于它是跨越许多学科的科学,而且是填补这些学科边界空白的边缘科学。因为系统工程的目的是研究系统,而系统不仅涉及工程学领域,还涉及社会、经济和政治等领域,为了圆满解决这些交叉领域的问题,除了需要某些纵向的专门技术以外,还要有一种技术从横向把它们组织起来,这种横向技术就是系统工程,也就是研究系统所需的思想、技术和理论等体系化的总称[23]。"

(3) 日本学者寺野寿郎说:"系统工程就是为了合理地开发、设计和运用系统而采用的思想、程序、组织和方法的总称[24]。"

(4) 日本工业标准(JIS)规定:"系统工程是为了更好地达到系统目标,而对系统的构成要素、组织结构、信息流动和控制机构等进行分析与设计的技术"。

(5) 美国著名学者 H. 切斯纳(H. Chestnut)指出:"系统工程认为,虽然每个系统都由许多不同的特殊功能部分组成,而这些功能部分之间又存在着相互关系,但是每一个系统都是完整的整体,每一个系统都要求有一个或若干个目标。系统工程则是按照各个目标进行权衡,全面求得最优解(或满意解)的方法,并使各组成部分能够最大限度地互相适应。"

(6) 美国科学技术辞典的定义是:"系统工程是研究彼此密切联系的许多要素所构成的复杂系统的设计的科学。在设计这种复杂系统时,应有明确的预定功能及目标,而在组成它的各要素之间及各要素与系统整体之间又必须能够有机地

联系，配合协调，致使系统总体达到最优目标。在设计时还要考虑到参与系统的人的因素和作用。"

(7) 美国军用标准 MIL-STD-499A 定义："通过运用定义、综合、分析、设计、试验和评价的反复迭代过程，将作战需求转变成对系统性能参数和系统技术状态的描述；综合有关的技术参数，确保所有物理、功能和程序接口的兼容性，以便优化整个系统的定义和设计；将可靠性、维修性、安全性、生存性、人体工程和其他有关因素综合到整个工程工作之中去，以满足费用、进度、保障性和技术性能指标。"

(8) 美国国防部防务系统管理学院指出："系统工程是为了达到所有系统要素的优化平衡，控制整个系统研制工作的管理功能，把作战需求转变为一组系统参数的描述，并综合这些参数以优化整个系统效能的过程。"

(9) [美国学者]莫顿指出："系统工程是用来研究具有自动调整能力的生产机械，以及像通信机械那样的信息传输装置、服务性机械和计算机械等的方法，是研究、设计、制造和运用这些机械。"

(10) 美国质量管理学会系统委员会指出："系统工程是应用科学知识设计和制造系统的一门特殊工程学。"

(11) 苏联大百科全书的定义是："系统工程是一门研究复杂系统的设计、建立、试验和运行的科学技术。"

(12) 大英百科全书的定义是："系统工程是一门把已有学科分支中的知识有效地组合起来用以解决综合化问题的工程技术。"

(13) 钱学森指出："系统工程是组织管理系统的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有系统都具有普遍意义的方法，系统工程是一门组织管理的技术。"

(14) 许国志认为："系统工程是一大类工程技术的总称，它有别于经典的工程技术；它强调方法论，亦即一项工程由概念到实体的具体过程，包括规范的确立，方案的产生与优化、实现、运行和反馈。因为优化理论成为系统工程的主要内容之一，规划运行中的问题不少是离散的，所以组合优化又显得至关重要。[5]"

(15) 汪应洛指出："系统工程是以研究大规模复杂系统为对象的一门交叉学科。它是把自然科学和社会科学的某些思想、理论、方法、策略和手段等根据总体协调的需要，有机地联系起来，把人们的生产、科研或经济活动有效地组织起来，应用定量分析和定性分析相结合的方法和计算机等技术工具，对系统的构成要素、组织结构、信息交换和反馈控制等功能进行分析、设计、制造和服务，从而达到最优设计、最优控制和最优管理的目的，以便最充分地发挥人力、物力的潜力，通过各种组织管理技术，使局部和整体之间的关系协调配合，以实现系统的综合最优化。[8]"

综合归纳上述概念，本书认为：系统工程不是一门具体的工程技术，也不是一

种具体的方法,而是跨越各个科学技术领域,涉及经济、社会、心理、自然界等诸多领域的一门应用科学。从根本意义上来讲,系统工程是一种思维模式,而不是一种按照某种固定的方法就能得到预期结果的某种技术,研究如何使得组成系统整体的各子系统的功能全面、协调、可持续地发展,致使系统整体达到最优目标,还要充分发挥系统中人的作用。系统工程最基本的作用和意义就在于运用系统的观点,从整体上有效合理地开发工程的价值。将系统工程用于开发各专业领域的工程时,必然首先碰到与各种各样的工程领域环境密切相关的问题,自然也就产生了各种专业领域的系统工程,如农业系统工程、水利系统工程、交通系统工程、军事系统工程,等等,各个专业领域的工程系统都是各专业系统工程的直接有关的研究对象。虽然各个专业领域都建立了系统工程的研究方向,但是不能说研究某个具体领域的系统工程问题,只要局限于该领域的知识就可以了,也就是说,研究具体领域的系统工程问题,也必须站在人和自然和谐相处的宏观系统上考虑。或者,更本质更直接地说,系统工程是一种哲学思想,不能把它局限在是处理农业问题的哲学,还是处理水利问题的哲学。例如,研究装备建设领域的系统工程问题,不能只局限于军事需求、高新技术推动以及经费保障问题,而应该从国际环境、国内环境、自然环境等方面多层次全方位地考虑,当然,前三项是首先要考虑的因素。又如,研究水电站建设的系统工程问题,不能只局限于经济建设对电力的需要,不能只局限于水电建设的成本以及水电与火电、风电、潮电、太阳能电、核电等的关系,还应考虑近期的生态环境问题、气候变化问题、地质灾害问题、国际关系问题,以及国防问题、民族问题,还有国家未来的发展环境问题、若干年后的世界格局走向,等等。对于可能产生全球重大次生灾害和摧毁人们的心理承受底线的核电来说,需要考虑的问题会更加复杂。

1.2.4 目的工程系统

从系统的观点来看,开发一项工程,就是构建一个目的工程系统,构建目的工程系统的活动,实质上是人们通过对已有信息加工产生出新的信息,并把所得到的思维形式作用于外界的过程,这就是构思规划、制作实验的过程。于是,我们可以通过构思,推断出所要建造的目的工程系统的全寿命过程以及它在这个过程中可能遭遇的环境和对抗的各种想定,然后将这些信息作为系统工程的每个活动环节上的资源加以运用。虽然各种不同的目的工程系统都有不同的全寿命期,但是,可以用一个图来描述所有的目的工程系统的全寿命期,如图 1.15 所示。

需要指出的是,如果目的工程系统是战时自行武器系统,使用与退出时的可运输性常被人们所忽视。

世间一切事物的发展都是连续不断的,然而作为工程实践,又常表现出间断性、跨跃式。例如,计算机技术是不断发展的,但我们看到的都是亿次机、十亿次

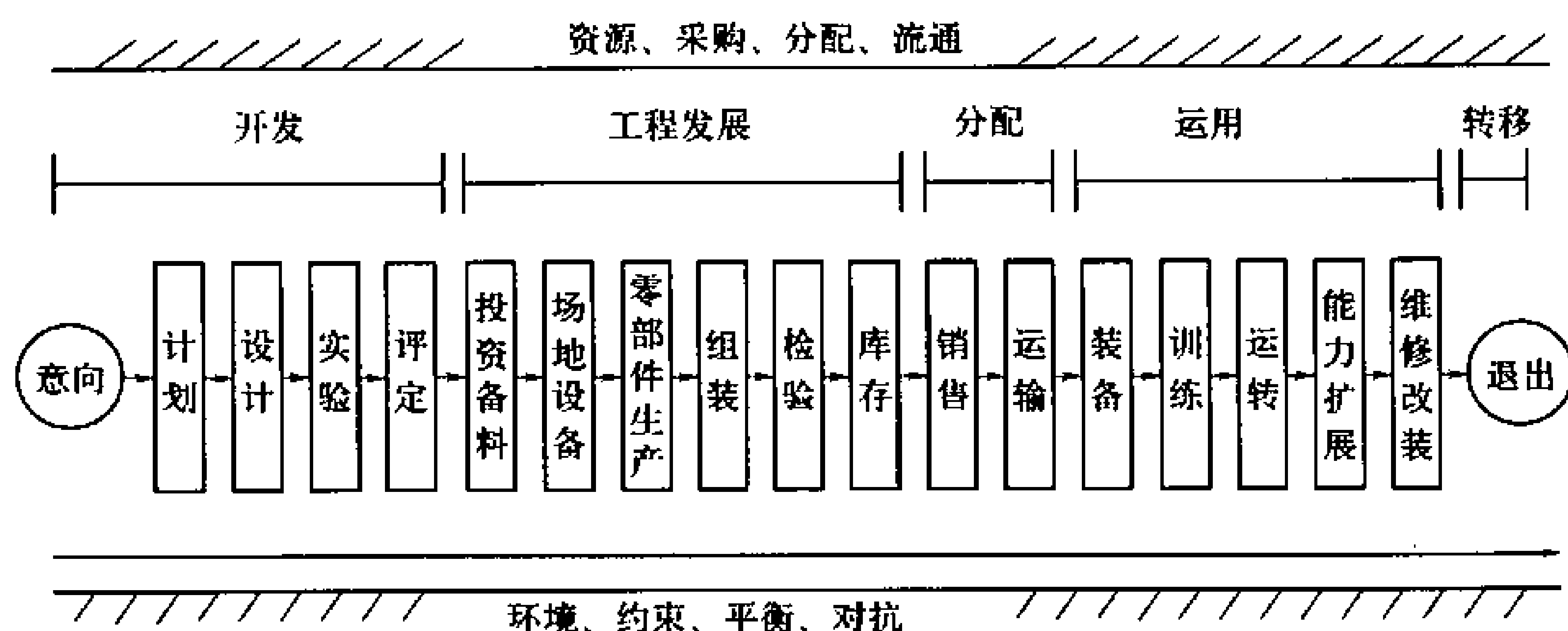


图 1.15　目的工程系统的全寿命过程

机、百亿次机、万亿次机等一代一代的计算机；又如，汽车工业技术是不断发展的，但我们看到的却是一代一代的汽车；对于战斗机也是这样。为了保证工程发展在时间上与外界相融合，时代线与里程碑的概念是非常重要的。“时代线”是在工程开发过程中用来使目的工程系统与环境变化相适应的一个重要概念。凡是被开发的目的工程系统总是要经过一段时间以后才能建成，这就需要依据当前的有关信息做出一些判断，去设定或推定目的工程系统的时代线。设定或推定目的工程系统的时代线是一个重要的创造性活动。

目的工程系统的“里程碑”是指目的工程系统从进入开发计划到失去价值的全寿命过程中所包括的几个主要阶段：工程探索、系统开发、工程制造、工程运用、工程退出等五个阶段，如图 1.16 所示。

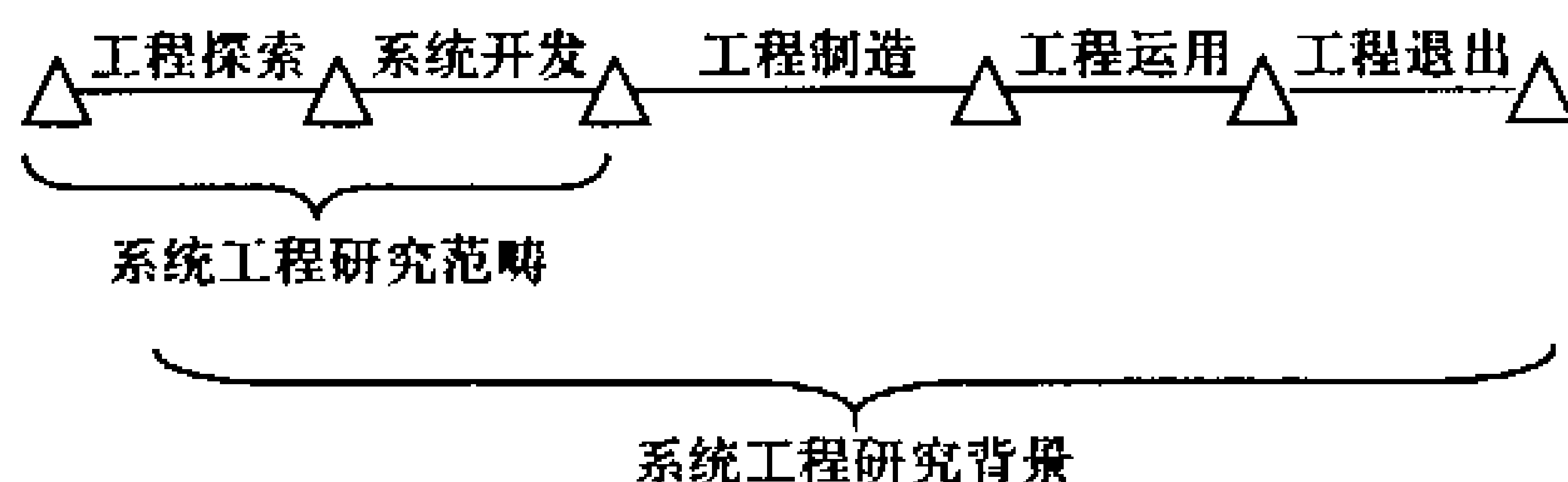


图 1.16　目的工程系统的五个里程碑

工程探索阶段又称为概念开发阶段，系统开发阶段又可分为评估阶段与演示阶段，这样，上述的五个阶段又可划分为六个阶段，如图 1.17 所示。

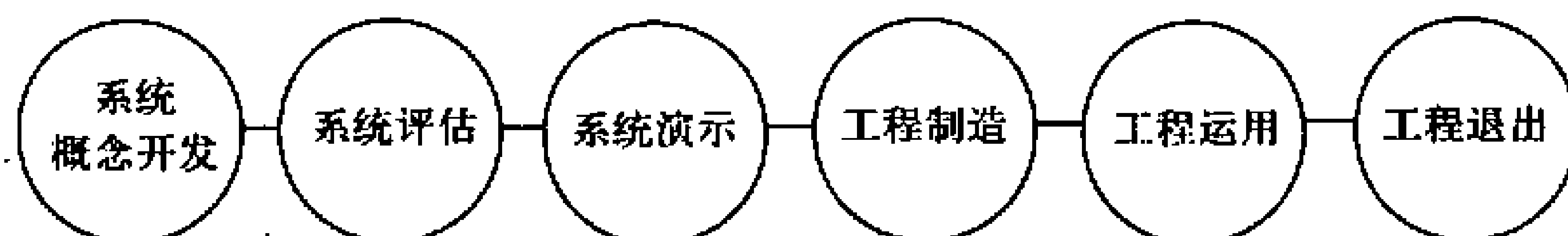


图 1.17　目的工程系统的六个里程碑

英国政府从1985年以后实行的装备采办的精明采购策略就是如图1.17所示的过程。对于每一个目的工程系统(武器装备系统)都成立一个由购买方与供货方之间形成的项目小组实施一体化管理,在目的工程系统从摇篮到坟墓的全过程,这个小组一直存在。英国在装备采办过程中,要求项目概念开发阶段的经费投入占全寿命费用的15%,可见概念开发阶段的重要性。

在工程探索以前,是工程开发任务提出阶段,工程开发任务的提出可能是由多种机会引起的,如直接需求、更大工程发展计划的分派、潜在引发。其中潜在引发是指某一个科学技术领域内出现了技术突破或者是某些技术储备的极大丰富而引起的应力作用。人们经常说的某一武器装备系统的研制任务的提出,基于三要素:军事需求牵引、技术进步推动、经费保障支持,其实其中的任何一个因素都可能起到牵引作用。

武器装备系统不同于民用的一般产品,特别是战略级的武器装备系统,其开发与使用要受到各方面的制约,因此研究战略级目的工程的宏系统结构是十分必要的。

对系统工程的宏系统的研究,其目的在于加深对任务的理解,从而能提出有效的(或有用的)、符合实际的工程开发方案和计划。研究宏系统要着重注意以下几个方面:

(1) 理解上层系统的任务、作用和方针。它们包括协调权衡的方针和原则;影响系统工程开发的重要因素;任务所处的地位和作用,这涉及任务的紧迫性和资源分配。

(2) 评价任务的环境原则。它们包括任务的度量事项、突出的优势所在、指标;重要性等级、现状和问题;可能得到的情报、资料及其有效性。

(3) 解决问题的有用经验和方法论。如目的工程的各种效能过程,即完成任务的模型;评价系统的方法论和模型。

(4) 可使用的工程技术储备和评价手段。如新的工程技术和工艺技术及技术专长可能在哪些领域内发挥作用;研究和开发的能力、生产设备和支援体系的能力。

宏系统的结构如图1.18所示。从宏系统结构图中可以看到,国家级的宏系统在结构上被划为五级(五个层次),它们分别是:

(1) 0级。它为最高级,其职责和地位是以国家整体利益为核心,其中国家的安全和统一又被称作国家核心利益,制定国家的根本目标和方针政策,并确定国家计划和当前急需解决的问题。为此,除了分析国家面临的政治、经济形势之外,还要分析国际环境。在确定国家的目标和方针时,对于历史和文化的研究也占一定的地位。

(2) Ⅰ级。国家的行政部门,他们是以国家目标和方针政策为前提,提出各部

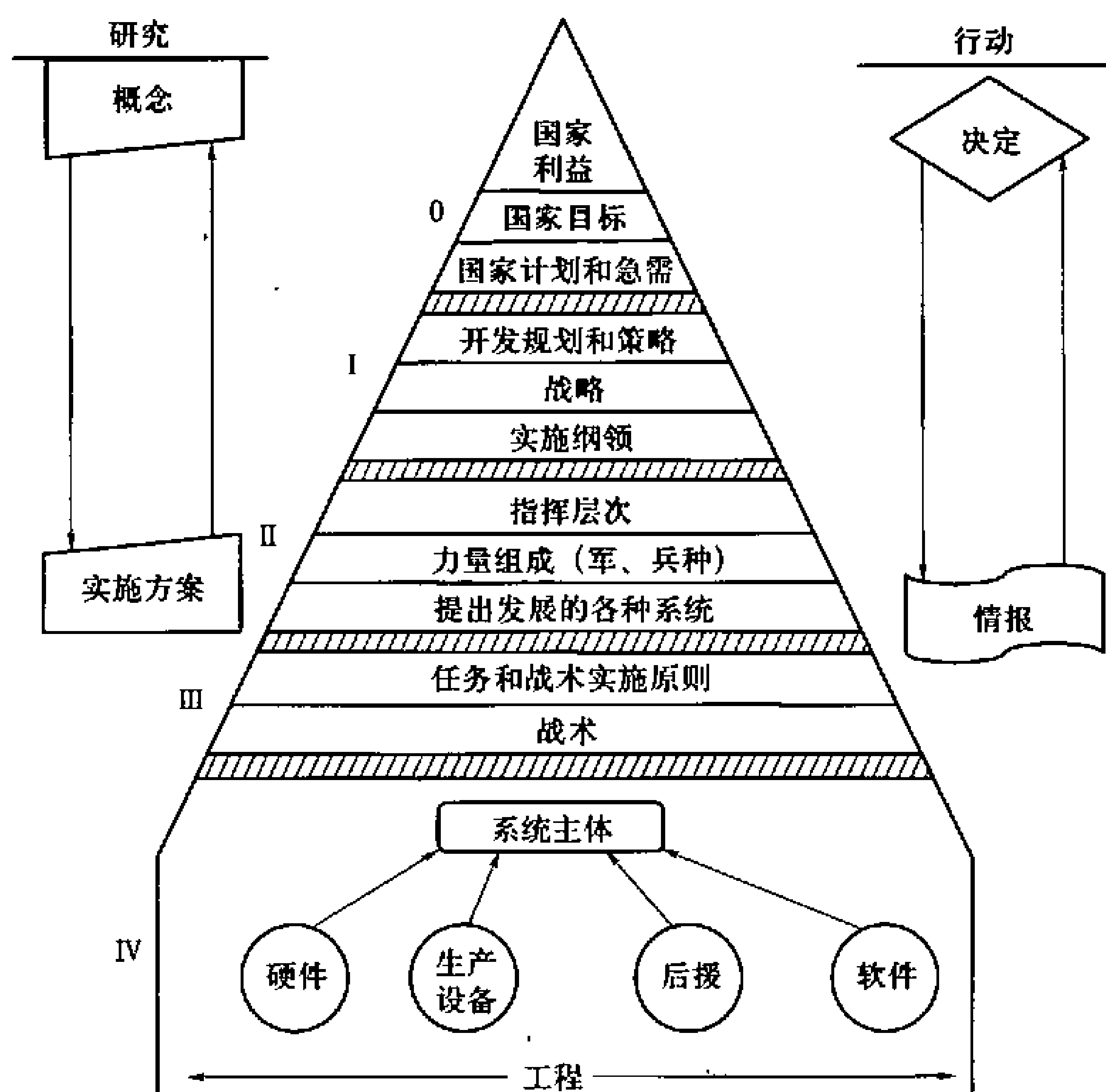


图 1.18　宏系统结构

门的规划、开发策略和战略计划，并组织实施这些规划和计划。

(3) Ⅱ级。作战司令部，他们实施战略计划，并组织战役行动，通常一些具体的系统如工厂、武器系统的开发都是他们提出建议或组织实施的。

(4) Ⅲ级。战役实施机构，他们组织战术行动、制定战术实施原则。

(5) Ⅳ级。分队级，运用和设计制造各种实体系统。

这个三角形图的两侧图形所显示的意思是，上一级活动所提出的课题，往往就是下一级行动的目标，如左侧图所示。而右侧图显示上级向下级发送的信息主要是决定，这个信息通道的界面要宽，即要使得更多的下级机构都知道上级的意图。而下级向上级发送的信息主要是情况报告，这个通道的界面要窄，因为这些信息都是一些原始的东西，还没有上升为策略或理论，如果扩大了传播面将会引起混乱。

1.2.5　系统工程与相关学科的关系

1993 年，钱学森提出了包含现代科学与技术体系在内的人类知识体系结构，如图 1.19 所示。

马克思主义哲学——人类认识客观和主观世界的科学												哲学
性智←		量智 →										
文艺活动	美学	建筑哲学	人学	军事哲学	地理哲学	人天观	认识论	系统论	数学哲学	唯物史观	自然辩证法	桥梁
	文艺理论	建筑科学	行为科学	军事科学	地理科学	人体科学	思维科学	系统科学	数学科学	社会科学	自然科学	基础科学
												技术科学
	文艺创造											工程科学
←实践经验知识库和哲学思维→												前科学

图 1.19 人类知识体系

由图 1.19 可知,人类知识体系由以下 3 个大的层次构成。

1. 前科学

前科学是指经验知识、感性知识以及不成文的实践感受。

这部分知识的特点是只知道是什么,还不能回答为什么,这类知识经过研究、提炼也将成为科学知识。

2. 科学与技术体系

科学知识的特点是,不仅知道是什么,还能回答为什么。今天,这部分知识已发展成为 11 个大的科学技术部门和 3 个层次所构成的体系,这就是现代科学与技术体系。中间部分表示了 11 个大的科学与技术部门,即自然科学、社会科学、数学科学、系统科学、思维科学、人体科学、地理科学、军事科学、行为科学、建筑科学、文艺理论。这是根据现代科学与技术发展到目前水平所作的划分,今后随着科学与技术的不断发展,还会产生出新的科学与技术部门,所以,这个体系是个动态发展和开放的系统。

每一个科学与技术部门里包含着认识世界和改造世界的知识,而这些知识又处在不同层次上。自然科学经过 300 多年的发展,已形成了 3 个层次,底层是直接用来改造客观世界的工程技术,往上一个层次是为其直接提供理论基础的技术科学,再往上一个层次是揭示客观世界规律的基本理论,即基础科学。这 3 个层次反映了从认识世界到改造世界的科学与技术知识结构。从这个角度来看,它对其他科学技术部门同样也是适用的,唯一的例外是文艺,文艺只有理论层次,实践层次上的文艺创作就不是科学问题,而是属于艺术范畴了。

3. 哲学

哲学不仅是知识,还是智慧,马克思主义哲学是人类知识的最高概括,也是人

类智慧的最高结晶，作为一个思想体系，仍在不断地发展过程中。

这个结构还引入了“性智”与“量智”，即客观整体认识与微观定量分析，两者是互补、相辅相成的。

传统的工程技术运用自然科学和技术来解决工程产品的设计和制造问题，而系统工程则必须运用社会科学、经济学、工程技术等多方面的学科来解决工程发展中的社会性问题，它将主要涉及工程开发的规划、组织、管理、效果评定等活动，并以此来更有效地发挥科学技术的作用。正是依据这种现实，有时，也称系统工程是一门“社会—技术”学科[20]。

系统工程这一社会科学和工程技术相结合的性质可以从兰德公司的人员结构中得到例证。1972 年该公司具有博士学位的人员中，47 人是社会学博士，44 人是经济学博士，31 人是工程学博士，其他学科，如物理、数学、教育、计算机、政治、法律、医学等，合计 30 人。兰德公司主要人员的这种结构，清楚地表明系统工程关注的是应用层次，它的任务就在于综合运用有关社会科学和技术来解决工程发展中的系统性问题。它不像科学学科那样在于创造和发现新的定律、定理、方法和技术。

系统工程在大的工程项目中与其他众多的工程技术总是相辅相成的：一方面，在系统工程的规划下，各项工程技术作为实现总体目标的手段，可以充分发挥作用；另一方面，如果脱离了其他工程技术，系统工程就成了空中楼阁，无立足之基，即使规划得再好也没有实际意义。

在工程项目中，系统问题（战略规划、战略决策）与工程技术问题相比，就如同数学计算中的整数与小数关系一样，整数部分算错了，小数部分再精确也没有什么意义了。系统工程的地位就在于能为决策者提供决策支持，并直接影响决策，影响全局。

在社会系统中，凡属战略决策问题，必须重视系统工程的规划研究，发挥系统工程的积极作用，经济政治体制改革就是一项应用系统工程通过规划研究进行战略决策的社会经济巨系统。

系统工程在自然科学、工程技术和社会科学之间起到了一座桥梁的作用，也为自然科学工作者、工程技术工作者同社会经济工作者的密切合作搭建了广阔的平台。

事实上，系统工程任务原来就存在于各种各样的工程发展之中，也正是在这些工程发展的共同问题中归纳发展起来的。但是，又必须强调指出：只有自觉地研究和运用它，才能帮助我们把事情办得更好、更有效，才能避免产生不利的后果或失败。

如果不开展系统工程研究，仅从技术观点出发，不但不能发挥技术的作用，还很可能在解决一个问题时给另一个问题带来更大的困难。十分遗憾的是，这样的

例子现实生活中还很多。

例如,20 世纪 80 年代初,长沙市“银盆岭”居民小区先后建成了 10 多万平方米的住宅,由于没有与水源工程配套,建成 3 年多了还不能住人,问题不仅是没有建水泵房和输水管道,严重的是还涉及自来水公司的建设和该地区的水源问题。自来水公司日供水能力只有 17 万吨,而当时该地区的需水量已达 25 万吨,当然就顾不上这批新建的住宅了,这就需要增加水井,但地下水源又不足,因而就成了一个大难题。

又如,河北省保定市是华北地区的一座历史文化名城,新中国成立以后,随着经济的发展,旧城区道路狭窄和发展空间狭小的问题日益严重,国家“一五”计划时期,在西郊靠近水源地相继建成了八大工厂,西城区建设突飞猛进,与老城区一起逐渐形成了双核心的功能区布局。由于没有进行系统分析,目前城市的发展面临着非常突出的问题:作为老城区的东城区,商业密集,道路狭窄,交通拥堵,不仅旧城区改造的资金缺口巨大,而且如何保持古城特色也成了极大的问题;而作为新城区的西城区,商业落后,工厂林立,由于受来自西北方向季风和地形的影响,严重地污染着下游居民区的空气和水源。理想的布局应该是早做规划,可逐步将重工业企业迁至南郊,南郊不仅是季风和水源的下游,而且铁路交通方便。

系统工程与传统工程技术的区别见表 1.3。

表 1.3　系统工程与传统工程技术的区别

类别	传统工程技术	系统工程
研究性质	运行性、操作性学科	方法、原理、意图的科学或方法论
研究方法	由下而上,部分到整体,强调单个元素的性能	由上到下,由整体到部分,强调整体
处理内容	硬件	软件(信息)
处理结果	多为具体的解	求取整体最优
研究对象	物资系统,实体系统	物资系统,概念系统
研究范围	某一领域	多领域
知识结构	专业、纵向	多学科杂交,纵横交叉

运筹学是近半个多世纪发展起来的一门学科。为达到一定目的去做某件事情、执行某项任务、开展某种活动之前,人们总要进行一番筹划和安排,总想在一定的客观条件下,合理有效地运用资源和有效的经营运作,把事情处理得更好一些,以期得到更满意的效果。运筹学重视有关活动的数量分析,建立数学模型,寻求解决问题的最优方案,这就是运筹学的基本思想。

在当代，运筹学的研究对象是社会，目标是最优化，它是经营管理的科学、作战指挥的科学、规划计划的科学、管理政务和治理国家的科学。

运筹学的主要内容体系如图 1.20 所示。

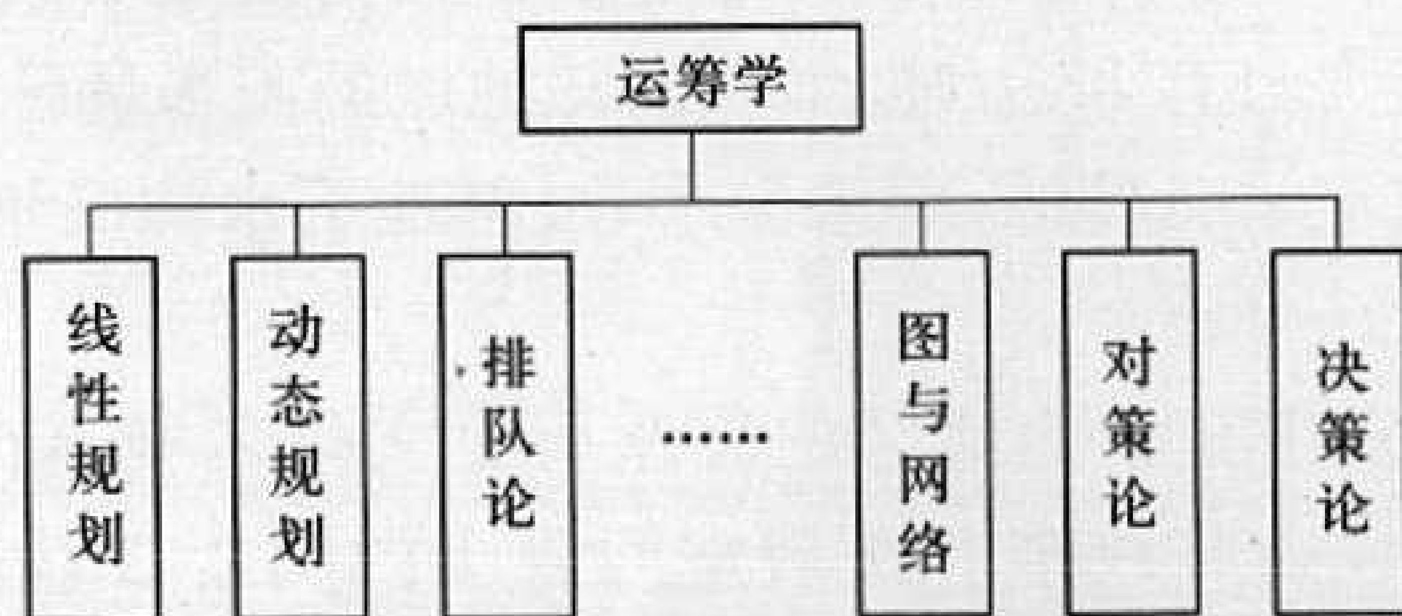


图 1.20　运筹学的主要基础理论

运筹学和系统工程是在不同的历史阶段、在同一方向上发展起来的。运筹学已成为系统工程的主要理论基础，而系统工程覆盖了运筹学，并与管理科学和计算机技术形成交叉关系。图 1.21 表示了系统工程、运筹学、管理科学和计算机技术等四个学科的交叉关系。

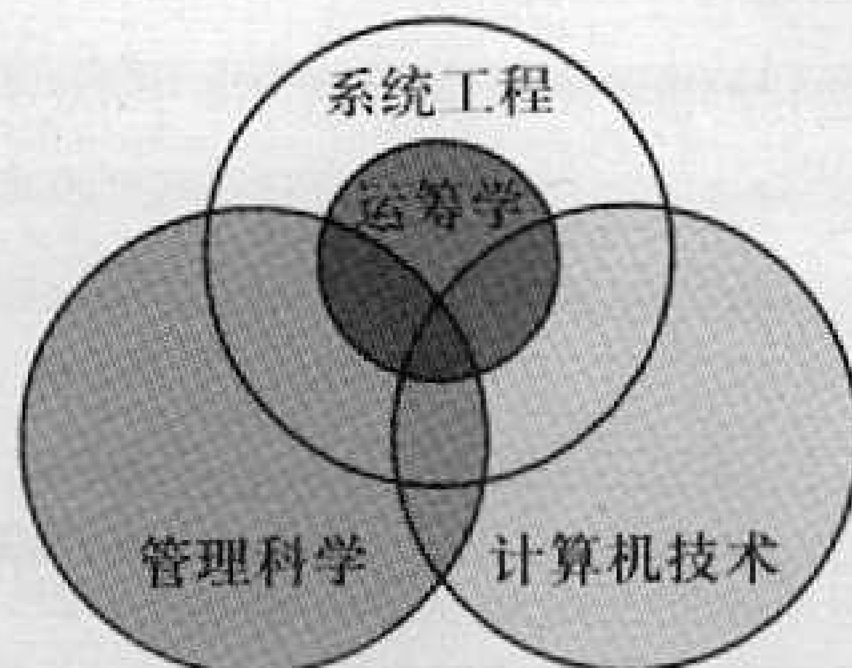


图 1.21　四个学科的交叉关系

系统工程与运筹学，既有联系，又有区别：

(1) 运筹学是从系统工程中提炼出来的基础理论，属于技术科学。

(2) 运筹学解决具体的“战术问题”，而系统工程侧重于研究战略性的“全局问题”。

(3) 运筹学只对已有系统进行优化，系统工程从系统规划设计开始就运用优化的思想，是研究整个过程的理论。

(4) 运筹学研究的问题具有明确的约束条件，简单地说只有两类，在一定的投入下，如何使产出更好更多，在一定的产出下，如何使投入更少更省；系统工程研究的问题不受这种限制。

(5) 运筹学既是系统工程的基础理论，又是实现系统工程实践的计算手段，是为系统工程服务的；系统工程着重于概念、原则、方法的研究，有时，只把运筹学作为手段和工具使用，系统工程更强调方法论。

1.3 系统工程方法论

无论是发展理论还是解决复杂实际问题，都面临着不同层次的知识（经验的、实验的、哲学的），不同领域不同学科的知识（自然科学、社会科学、数学科学等），不同类型的知识（定性的、定量的），如何把这些知识、智慧综合集成起来，涌现出新知识和智慧，也就是如何综合运用人类知识体系这个宝贵的知识资源，提高认识世界的水平和增强改造世界的能力。这就涉及到方法和方法论的问题。

1.3.1 系统工程方法论的概念

方法（method）的定义：关于解决思想、说话、行动等问题的门路、程序等。

方法论（methodology）的定义：①关于认识世界、改造世界的根本方法的学说。②在某一门具体学科上所采用的研究方式、方法的综合。

方法和方法论是两个不同层次的问题。方法，指以系统思想为指导，为提高和改善解决问题过程的效率和有效性而发展出来的一套原则和步骤。方法论，指在更高的层次对如何分析和用好各类方法的专门研究。也就是说，方法论是关于研究事物所遵循的途径和线路，而方法不止一种，可能有多种方法。如果方法论不对，具体方法再好，也解决不了问题。

综上所述，方法论就是解决问题的辩证程序的总体。通过这样的程序把问题和可用的技术联系起来，求得问题的解决。它的意义可以说是设定问题的环境，即解决问题的概念、目标（功能目标和价值目标）、结构关系和过程、途径、方法选择依据等，也常称之为方法框。据此可知，系统工程方法论就是解决系统工程问题的方法框。

提到方法论这个词，可能有点费解，实际上人们时时刻刻都在用到它。例如，我们在做一个物理题时，首先要充分了解题意；其次要明确所要求的解；第三要了解给定条件；第四要考虑用到哪些定理、定律；第五要考虑由给定条件可推导出的其他有用条件；第六要考虑有哪些计算方法可用；第七要检查计算结果，判断答案准确性。这就是做一道物理题的方法论。

又如，要完成一篇军事装备学的博士学位论文，首先要搞清楚博士学位论文的基本要求，搞清楚军事装备学的学科内涵，它是研究装备建设、管理和保障活动的理论与实践及其规律的一门军事学科。既然如此，就要从装备建设管理和保障活动中的实际问题出发，探求产生问题的原因，收集分析总结国内外解决相关问题的理论与方法，深入研究并提出具有创新性的成果，最后提出解决问题的对策建议。从研究的内容来说，涉及装备发展、装备试验、装备采购、装备动员、装备平时管理、装备战时保障、装备管理保障中的指挥活动、装备退役报废和转移等全寿命期管理

活动,也涉及陆军装备、海军装备、空军装备、二炮装备、航天装备、主战装备、保障装备、电子信息装备、通用装备、专用装备、特种装备等武器装备系统分类,也涉及战略、战役、战斗等规模层次,还涉及定性分析、定量分析、对比分析、层次分析、统计分析和模糊数学分析等分析方法。论文的题目与关键词也大多包括这三个方面的内容,如图 1.22 所示。

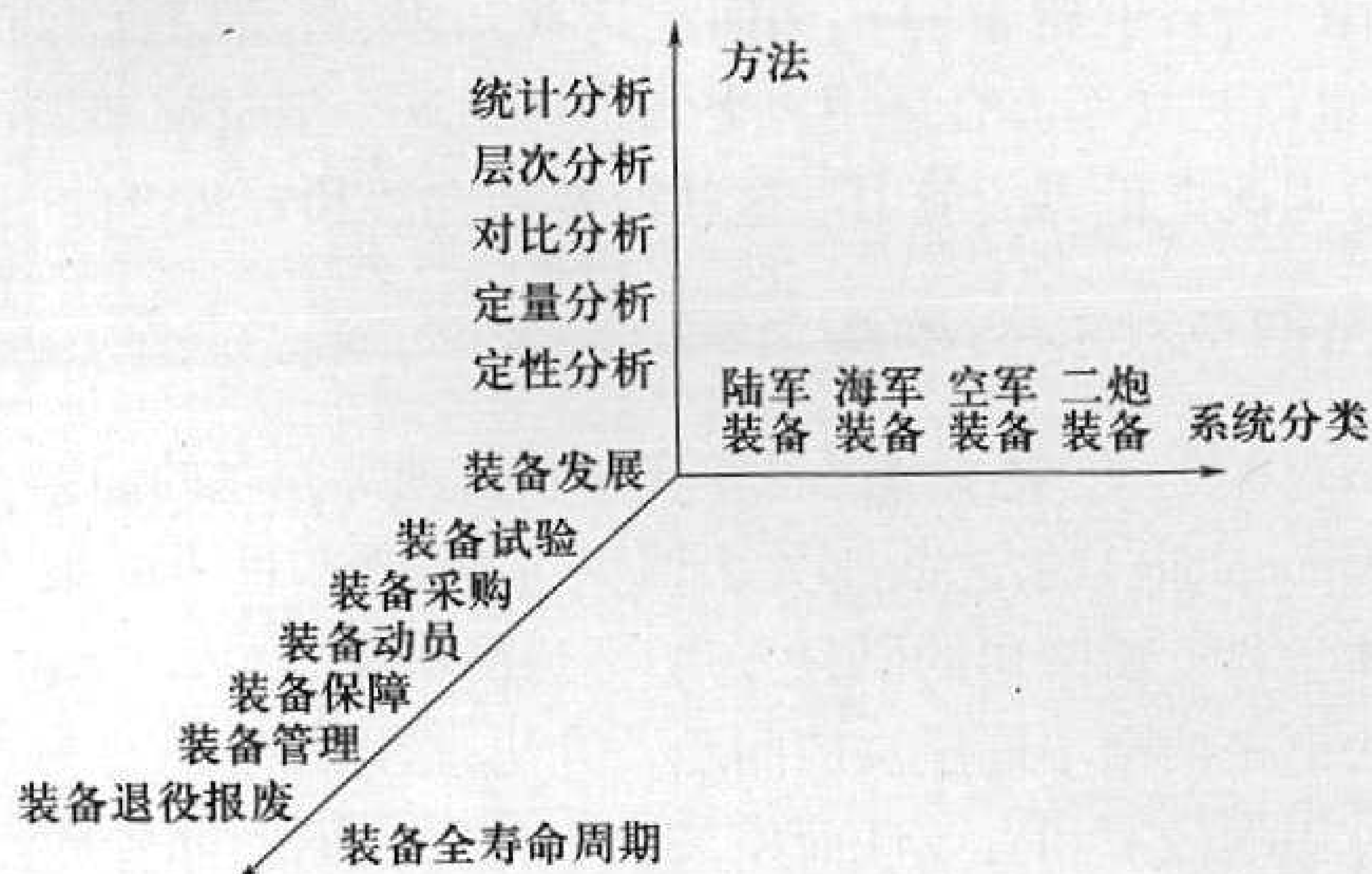
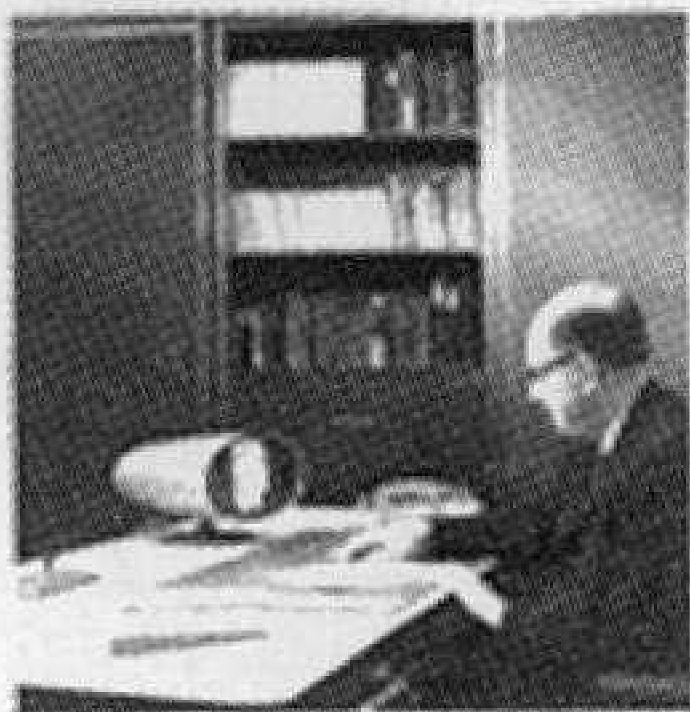


图 1.22　军事装备学博士论文的三维结构

现代系统思想兴起以后,学术界逐步将实践中用到的方法提升到方法论的高度。现根据系统工程方法论提出的时间顺序介绍霍尔(A. D. Hall)方法论、切克兰德(Checkland)系统工程方法论、综合集成系统方法论和物理—事理—人理系统方法论[6,7,9,10,12]。

1.3.2　系统工程方法论的主要代表

1. 以霍尔为代表的硬系统工程方法论



霍尔

1969 年,美国贝尔电话公司的工程师霍尔总结开展系统工程的经验,写了《系统工程方法论》一书,提出了著名的三维结构方法体系。该方法来源于"硬"的工程系统,适用于良性结构系统。这种思维过程,针对大多数硬的或偏硬的工程项目是卓有成效的,受到了各国学者的普遍重视。

霍尔提出的三维结构方法体系,对系统工程的一般过程做了比较清楚的说明,他将系统的整个管理过程分为前后紧密相连的时间维的 7 个阶段和逻辑维的 7 个步骤,并同时考虑到为完成这些阶段和步骤的工作所需的各种专业知识和管理知识。三维结构由时间维、逻辑维和知识维组成,如图 1.23 所示。

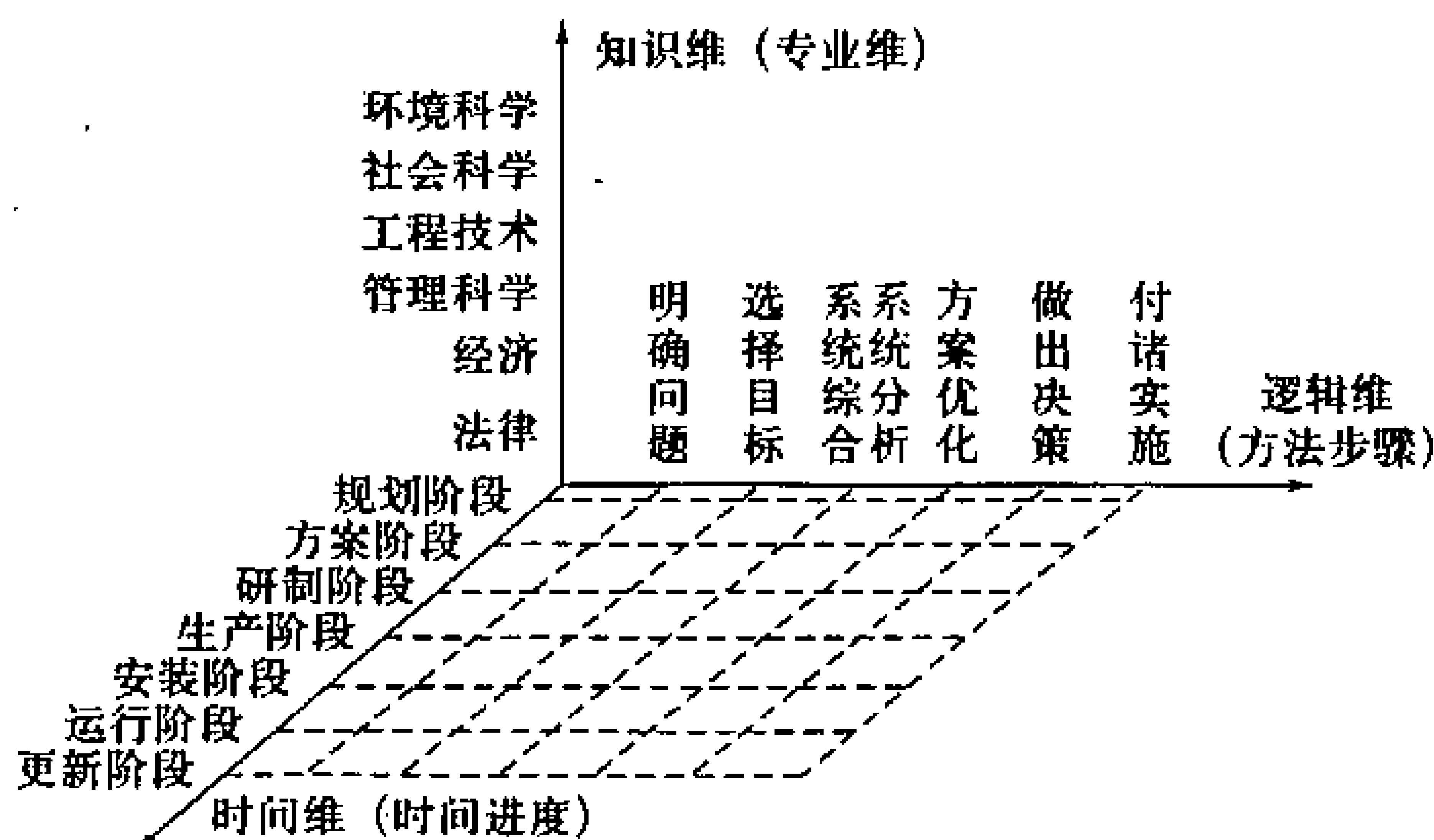


图 1.23　霍尔提出的三维结构方法体系

1）时间维

时间维反映了系统实现的过程。一个具体的系统工程活动，从规划阶段到更新阶段按时间顺序排列，可分为 7 个工作阶段。

（1）规划阶段。对将要开展研究的系统进行调查研究，明确研究目标，提出设计思想和初步方案，制定出系统工程活动的方针、政策和规划。

（2）方案阶段。根据规划阶段提出的若干设计思想和初步方案，从社会、经济、技术可行性等方面进行综合分析，提出具体计划方案并选择一个最优方案。

（3）研制阶段。以计划为行动指南，把人、财、物组成一个有机整体，使各个环节、各个部门围绕总目标，实现系统的研制方案，并做出生产计划。

（4）生产阶段。生产或研制开发出系统的零部件（硬件、软件）及整个系统，并提出安装计划。

（5）安装阶段。把整个系统安装调试好，试验运行，制定出运行计划。

（6）运行阶段。系统按照预定目标运行服务，要考虑消耗和折旧。

（7）更新阶段。完成系统的评价，在现有系统基础上，改进或更新系统，使系统更有效地工作，同时为下一个研制周期准备条件。

2）逻辑维

逻辑维表示用系统工程方法解决问题的步骤，大体分成 7 个步骤。它是时间维的每个阶段都要进行的工作步骤（逻辑的思考过程），也是运用系统工程方法进行思考、分析和解决问题时应遵循的一般程序，如图 1.24 所示。

（1）明确问题。尽可能全面地收集资料、了解问题，包括实地考察和测量、调研、需求分析和市场预测等。

（2）选择目标（系统指标设计）。对所解决的问题，提出应达到的目标，并制定出衡量是否达标的准则。

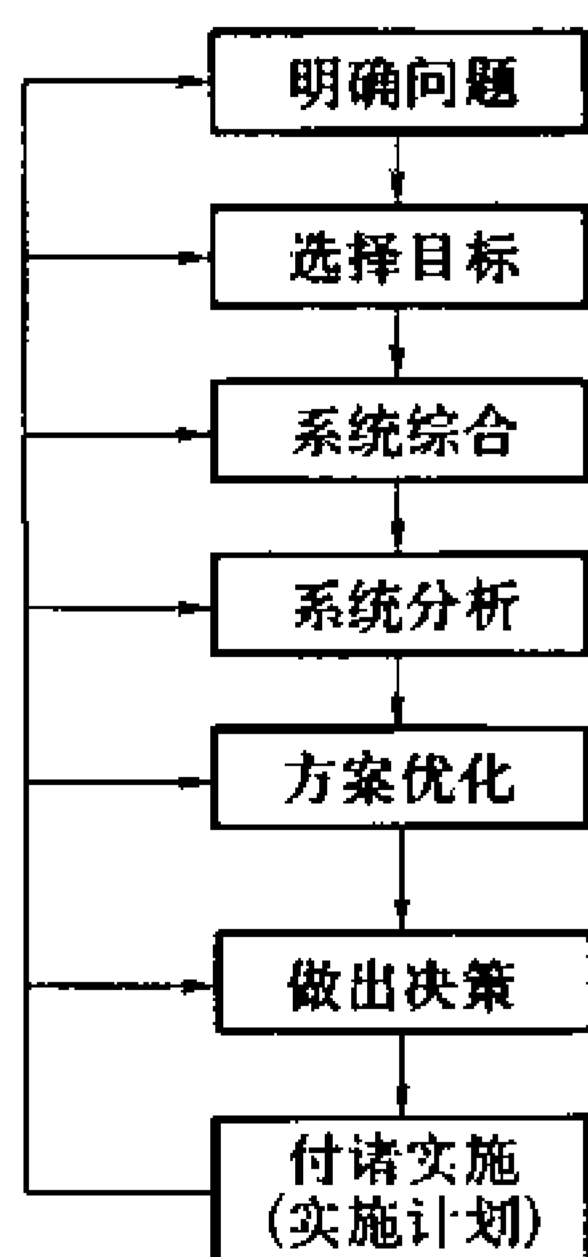


图 1.24 逻辑维的七个步骤

(3) 系统综合。按照问题的性质及总目标形成一组可供选择的系统方案,对每一种方案进行必要的说明。在系统方案综合时最重要的问题是自由地提出设想。

(4) 系统分析。应用系统工程方法、技术,将系统综合得到的各种方案,系统地进行比较、分析,必要时,建立数学模型进行仿真实验或理论计算。

(5) 方案优化(系统选择)。对数学模型给出的结果加以评价,判别各种方案优劣,筛选出满足目标要求的最佳方案。

(6) 做出决策。确定最佳方案。这时必须由领导根据更全面的要求,最后做出决策,选择一个或几个方案来试用,有时不一定就是以上的最优方案。根据系统工程的咨询性,决策步骤并非系统工程师的工作,但是对于决策技术的研究,则是系统工程的课题之一。

(7) 付诸实施(实施计划)。按决策结果制定实施方案和计划,完成各个阶段的管理工作。如果实施过程比较顺利或遇到的困难不大,实施计划可略加修改和完善即可,并把它确定下来,那么整个步骤即告一段落。如果实施过程中问题较多,就有必要回到上述逻辑步骤中从认为需要的一步开始重新做起,然后再决策或实施,这种反复有时会出现多次,直到满意为止。

3) 知识维或专业维

三维结构中的知识维是指完成上述各阶段各步骤的工作所需要的各种专业知识和管理知识,包括工程技术、经济学、法律、数学、管理科学、环境科学、计算机技术等方面的知识。

4) 霍尔管理矩阵

将 7 个时间阶段和 7 个逻辑步骤结合起来,便形成了所谓霍尔管理矩阵,又称

系统工程活动矩阵,见表 1.4。

表 1.4 系统工程活动矩阵

时间维	逻辑维						
	1. 明确问题	2. 选择目标	3. 系统综合	4. 系统分析	5. 方案优化	6. 做出决策	7. 付诸实施(实施计划)
1. 规划阶段	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}
2. 方案阶段	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	a_{26}	a_{27}
3. 研制阶段	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}	a_{35}	a_{36}	a_{37}
4. 生产阶段	a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}	a_{45}	a_{46}	a_{47}
5. 安装阶段	a_{51}	a_{52}	a_{53}	a_{54}	a_{55}	a_{56}	a_{57}
6. 运行阶段	a_{61}	a_{62}	a_{63}	a_{64}	a_{65}	a_{66}	a_{67}
7. 更新阶段	a_{71}	a_{72}	a_{73}	a_{74}	a_{75}	a_{76}	a_{77}

矩阵中时间维的每一阶段与逻辑维的每一步骤所对应的点即矩阵中的各个元素,代表着一项具体的管理活动。矩阵中各项活动相互影响,紧密相关,要从整体上达到最优效果,必须使各阶段、步骤的活动反复进行。反复性是霍尔矩阵的一个重要特点,它反映了从规划到更新的过程需要控制、调节和决策。因此,系统工程过程充分体现了计划、组织和控制的职能。

系统方案的产生过程具有迭代性与收敛性两大特点。表 1.4 所述的系统工程展开过程借用希腊神话中的丰收女神(Almathea)之神羊角来比喻是十分形象的,如图 1.25 所示,丰收女神的神羊角原来的意义是:羊角号一吹,各种财富就源源不断地涌现出来。现在是以各种信息、物质、能量从左边输入,通过神羊角螺旋式地加工收缩,最后产生出一个理想的系统来。

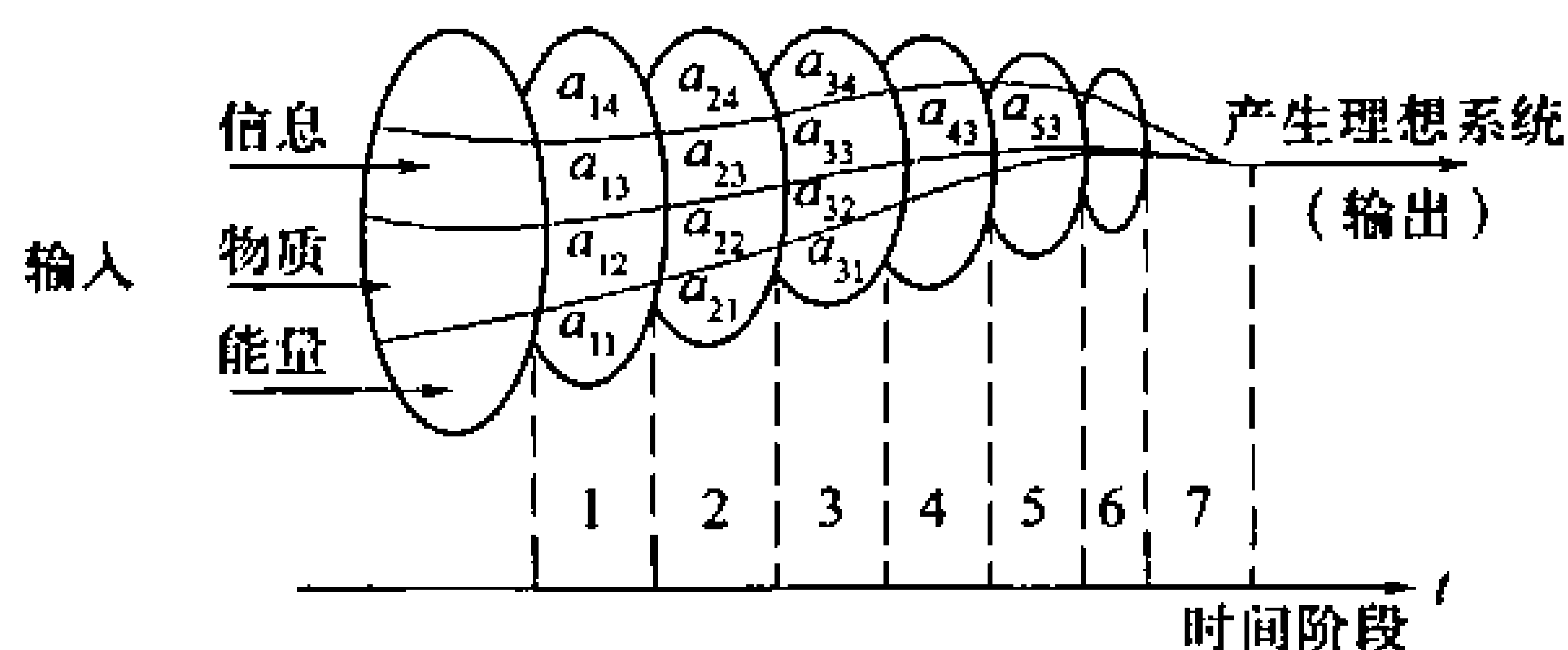


图 1.25 神羊角

从神羊角的大头向里看,得到图 1.26,霍尔称之为系统工程活动的全过程,它以逻辑维的 7 个步骤为一个循环周期。经过多次循环而汇聚为一个理想的系统。

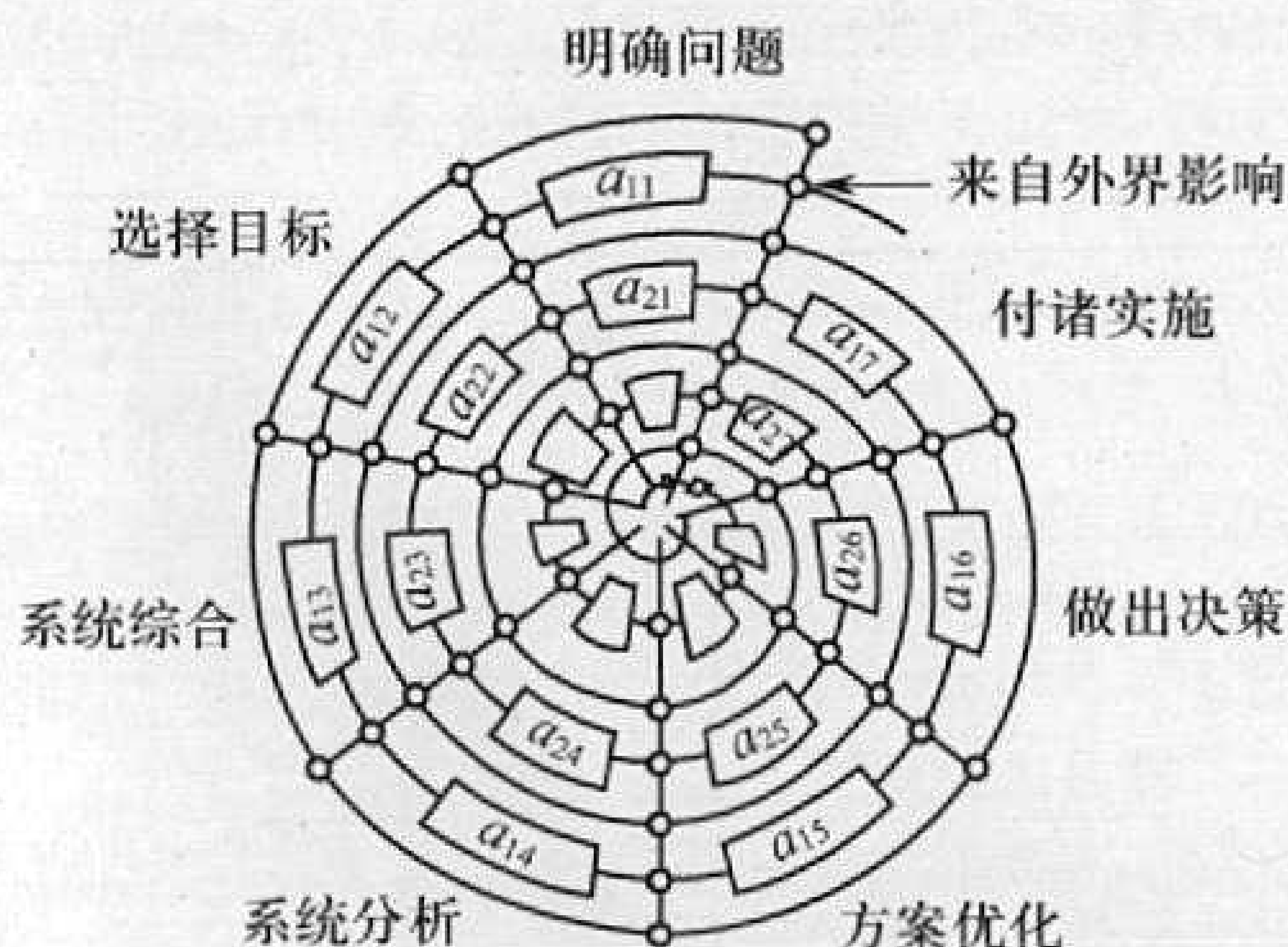
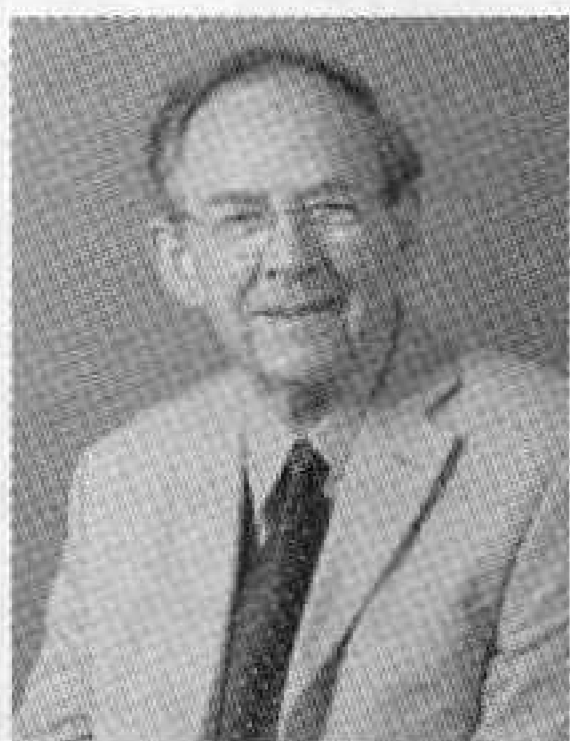


图 1.26　系统工程活动的全过程

2. 以切克兰德为代表的软系统工程方法论



切克兰德

软系统工程方法论是由英国学者切克兰德在 20 世纪 80 年代创立的，软系统工程方法论是在霍尔硬系统工程方法论的基础上提出来的。

以大型工程技术问题的组织管理为基础产生的硬系统方法论，扩展其应用领域后，特别是在处理存在利益、价值观等方面差异的社会问题时，遇到了难以克服的障碍：人们对问题解决的目标和决策标准（决策选择的指标）这些重要问题，甚至对要解决的问题本身是什么就有不同的理解，即问题是非结构化的。对这类问题，或更确切地称为议题（issue），首先需要的是不同观点的人们，通过相互交流，对问题本身达成共识。与硬系统方法论的核心是优化过程（解决问题方案的优化）相比较，切克兰德称软系统方法论的核心是一个学习过程。

切克兰德认为：完全按照解决工程问题的思路来解决社会问题和软科学问题，将遇到很多困难，至于什么是“最优”，由于人们的立场、利益各异，判断价值观不同，很难简单地取得一致看法。因此，“可行”、“满意”、“非劣”的概念逐渐代替了“最优”的概念。还有一些问题只有通过概念模型或意识模型的讨论和分析后，才能使得人们对问题的实质有进一步的认识，经过不断磋商、不断地反馈，逐步弄清楚问题，得出满意的可行解。切克兰德根据以上思路提出的方法论，称为“软系统方法论”。该方法的核心不是寻求“最优化”，而是“调查、比较”或者说是“学习”，从模型和现状比较中，学习改善现存系统的途径。因此，又被称为“调查学习法”。其方法步骤如图 1.27 所示。

1）系统现状说明

通过调查分析，对现存的结构系统的现状进行说明，目的是为了改善现状，弄清问题本身的基本定义。

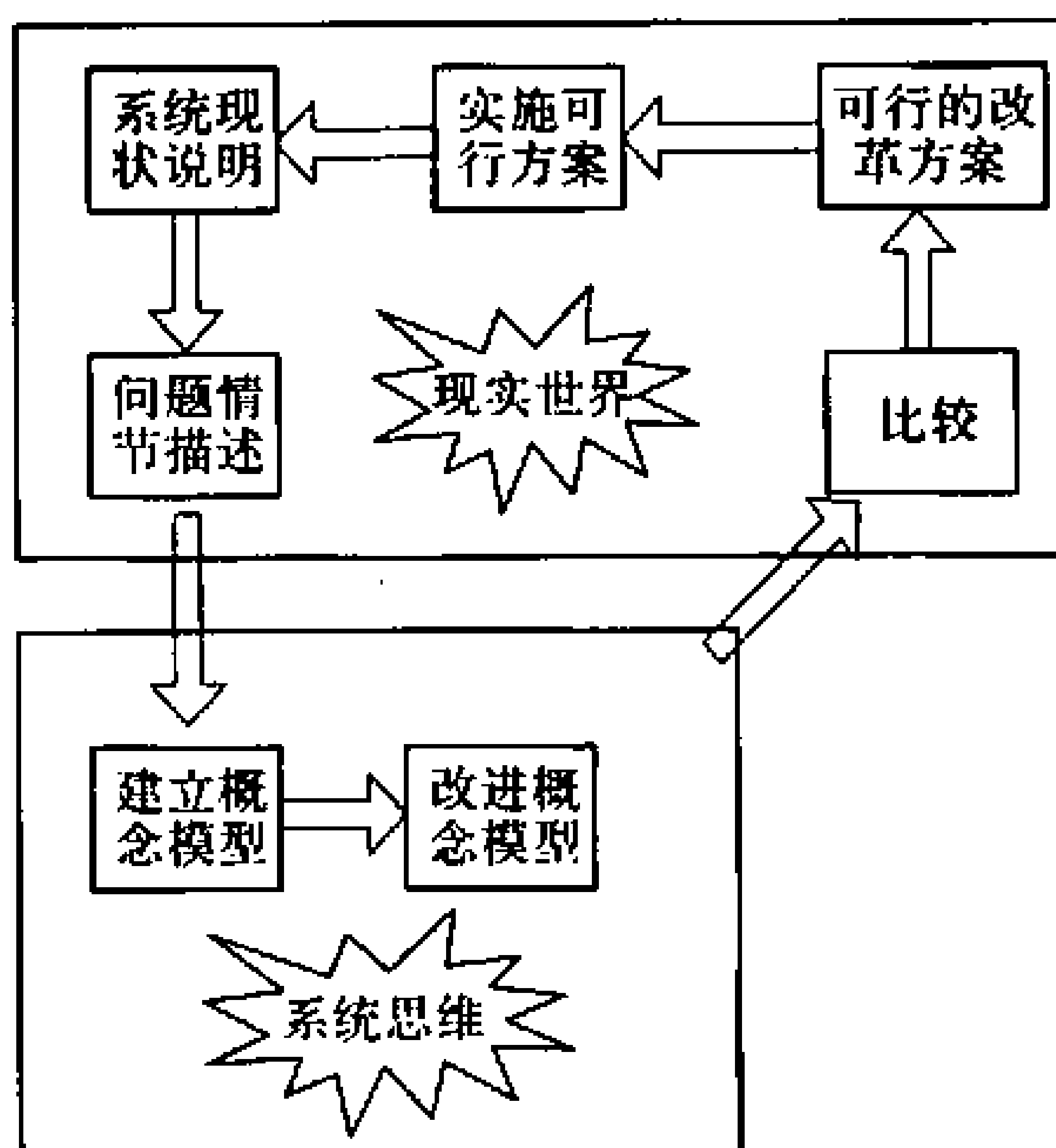


图 1.27 切克兰德系统工程方法论步骤

2) 运用“丰富图”(Rich Pictures)来表述问题

“丰富图”要能够尽可能多地捕捉到与问题相关的信息。一张较好的丰富图能够揭示问题的边界、结构、信息流以及沟通渠道等。最为关键的是,通过信息图,能够发现与问题相关的完整的人类活动系统。它是不为传统方法(如数据流程图和层次模型等)所包含的一种方法。

对于同一个问题情景,不同的人给出不同的定义。不同定义的交集将形成该问题情景的“内核”,其组成要素有:

C (customer):系统的受益者或受害者;

A (actors):系统执行者;

T (transformation process):系统由输入到输出的变换过程;

W (weltranschauung):赋予定义的维特沙(德文音译,大意是世界观,但还有价值观、伦理道德观之意);

O (owners):系统所有者;

E (environmental constraints):系统的环境约束条件。

这些要素组合起来就称为 CATWOE,其含义是:系统所有者(O)在维特沙(W)的规范下,使系统在环境约束条件(E)下,由系统执行者(A)通过变换(T)将其输入变换为输出,系统的受益者或受害者(C)就是受变换影响的人。

3) 建立概念模型

运用系统思想和方法描述系统活动的现状,在不能建立数学模型的情况下,用结构模型或语言模型来描述系统的现状。

4) 改善概念模型

随着分析的不断深入和“学习”的加深,进一步用更合适的模型或方法改进上

述概念模型。

5）比较

将概念模型与现状进行比较，找出符合决策者意图而且可行的改革途径或方案。

6）实施

实施提出的改革方案。

霍尔三维结构和切克兰德方法论均为系统工程方法论，均以问题为起点，具有相应的逻辑过程。它们的区别见表 1.5。

表 1.5　软硬系统工程方法论比较

硬系统工程方法论	软系统工程方法论	硬系统工程方法论	软系统工程方法论
硬问题	软问题	二元论	多元论
良结构	劣结构	最优化	准优化
知物之善	知理之善	问题解决	状态改善
还原论思维	系统论思维	最优方案	改革方案
目标确定	目标模糊	客观评价	主观评价
状态辨识	共识、沟通		

3. 综合集成方法论

钱学森在对开放的复杂巨系统长期研究的基础上，于 1989 年提出了从定性到定量的综合集成法，简称综合集成（meta - synthesis）。1992 年，钱学森又提出了这一科学方法的应用形式“从定性到定量综合集成研讨厅体系”（Hall for Work Shop of Meta - synthetic Engineering，HWSME）。综合集成的基础如图 1.28 所示。

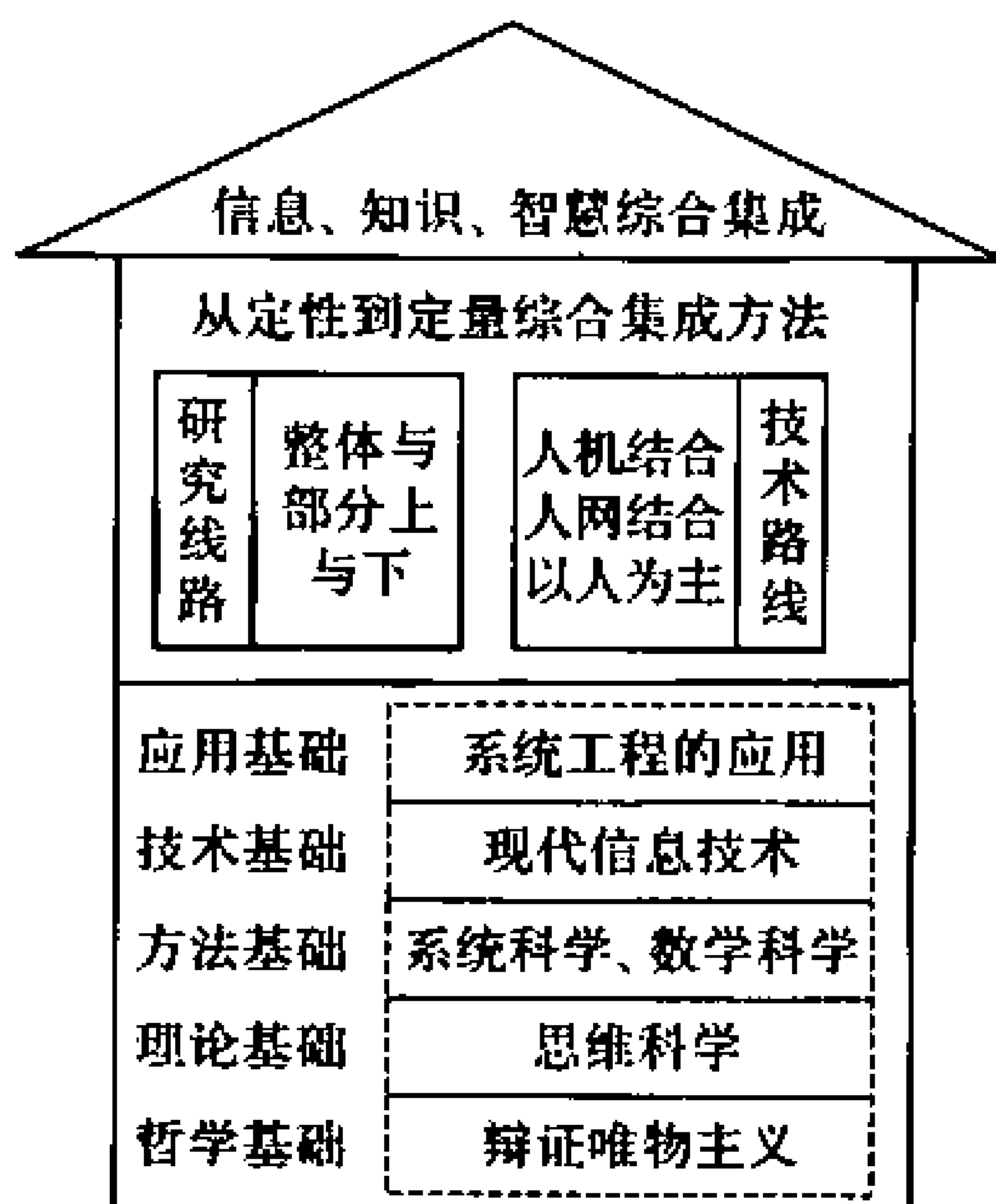


图 1.28　综合集成的基础

这套方法论是从整体上研究和解决问题的方法，采取人机结合、以人为主的思维方法和研究方式，对不同层次、不同领域的信息和知识进行综合集成，达到对整

体的定量认识。综合集成方法的实质是将专家经验、统计数据和信息资料、计算机技术三者的有机结合，构成一个以人为主的高度智能的人机结合系统，发挥这个系统的整体优势，去解决复杂的决策问题。

对开放复杂巨系统的综合集成要以人类积累的全部知识为基础，要在整个现代科学知识体系中作大跨度的跳跃，集大成，出智慧，产生新思想、新知识、新方法，钱学森称其为大成智慧。在哲学上，就是要把经验与理论、定性与定量、人与机、微观与宏观、还原论与整体论辩证地统一起来，综合集成法的特点如图 1.29 所示。

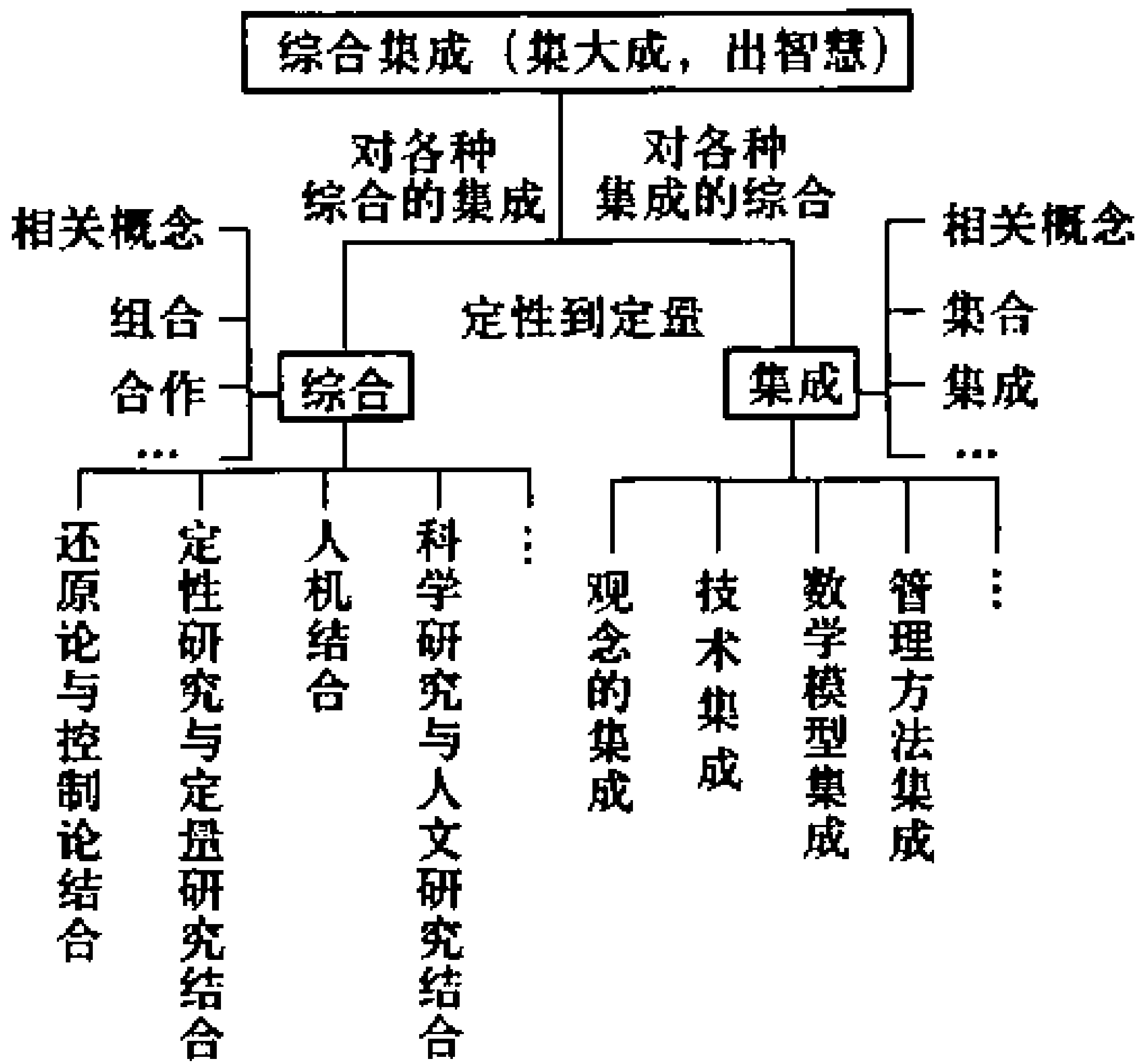


图 1.29　综合集成

运用综合集成方法解决开放复杂巨系统问题的基本步骤和要点如图 1.30 所示。

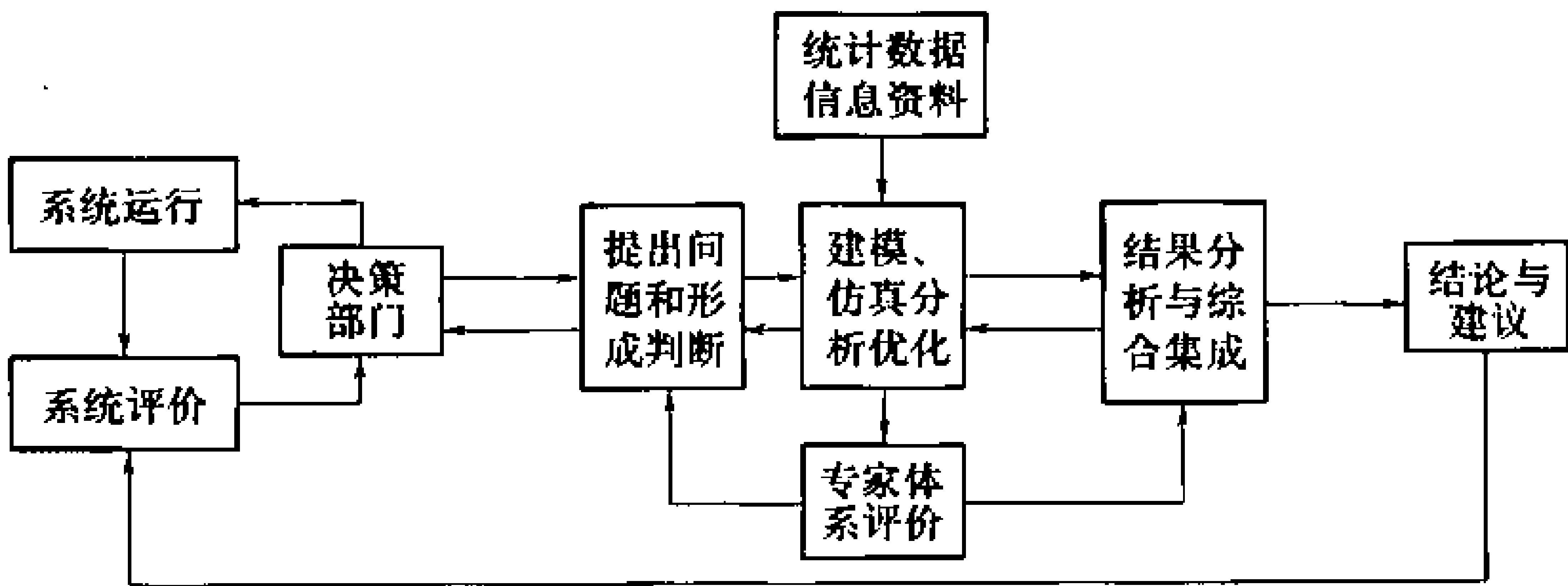


图 1.30　综合集成方法的步骤

（1）一个实际问题提出来后，研究者（或研究小组）首先要充分收集有关的信息资料，调用有关方面的统计数据，为开展研究工作做好准备。这些数据资料中包含系统的定性和定量特性信息，没有它们就不可能实现从对系统的局部定性认识经过综合集成达到对系统的整体定量认识。

（2）研究者约请各方面有关专家对系统的状态、特性、运行机制等进行分析研

究,明确问题的症结所在,对系统的可能行为走向及解决问题的途径做出定性判断,形成经验性假设,明确系统的状态变量、环境变量、控制变量和输出变量,确定系统建模思想。

(3)以经验假设为前提,充分运用现有的理论知识,把系统的结构、功能、行为、特性、输入输出关系定量地表示出来,作为系统的数学模型,以便用模型研究部分代替对实际系统的研究。

(4)依据数学模型把有关的数据、信息输入计算机,对系统行为做仿真模拟试验,通过试验,获得关于系统特性和行为走向的定量数据资料。

(5)组织专家群体对计算机仿真试验的结果进行分析评价,对系统模型的有效性进行检验,以便进一步挖掘和收集专家的经验、直觉,进行更深入细致的判断。所谓"触景生情"式的见解,常常是专家面对仿真试验结果时被诱导出来和明确起来的。如果再应用虚拟现实技术,可能会有意想不到的效果。

(6)依据专家们的新见解、新判断,对系统模型做出修改,调整有关参数,然后再做仿真试验,将新的试验结果再交给专家群体分析评价,根据新一轮专家意见和判断再次修改模型,再做仿真试验,再请专家群体分析评价,如此反复循环,直到计算机仿真试验结果与专家意见基本吻合为止。最后得到的数学模型就是符合实际系统的理论描述,从这种模型中得出的结论将是可信的。

研讨厅体系可以看作由三部分组成:以计算机为核心的现代高新技术的集成与融合所构成的机器体系、专家体系、知识体系,其中专家体系和机器体系是知识体系的载体。这三个体系构成高度智能化的人机结合体系,不仅具有知识与信息采集、存储、传递、调用、分析与综合的功能,更重要的是具有产生新知识和智慧的功能。图 1.31 是研讨厅体系的简单示意图。

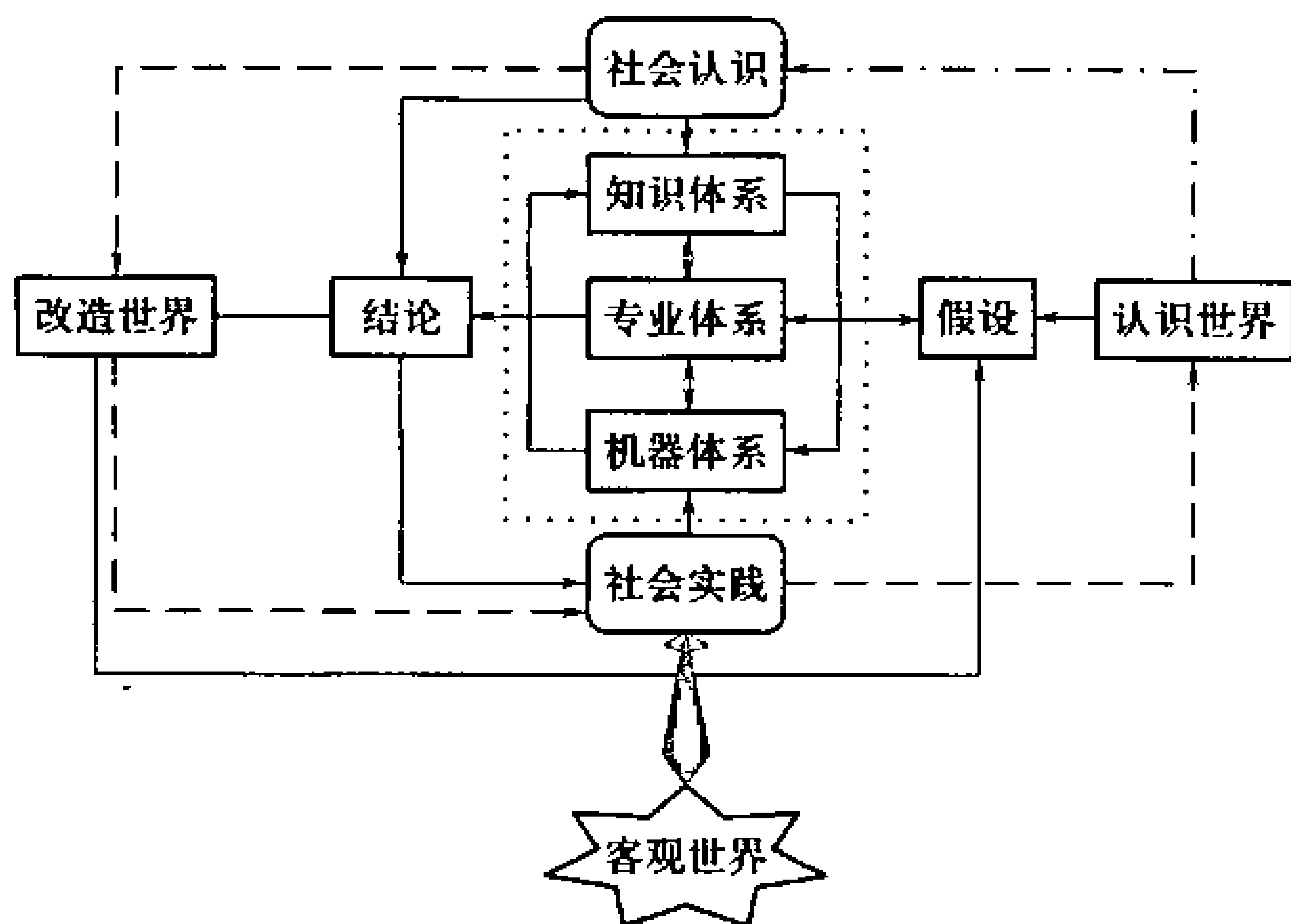


图 1.31 研讨厅体系

4. 物理—事理—人理系统方法论

东方的系统思想在3000多年前即开始,"天人相应"、"天人合一"是东方所推崇的系统思想,因此现代东方系统方法论认为系统运动图应在两端加以修改,一端是它的起源,应加入古代系统思想,特别是中国古代的系统思想。图1.32画出了新的系统运动图。

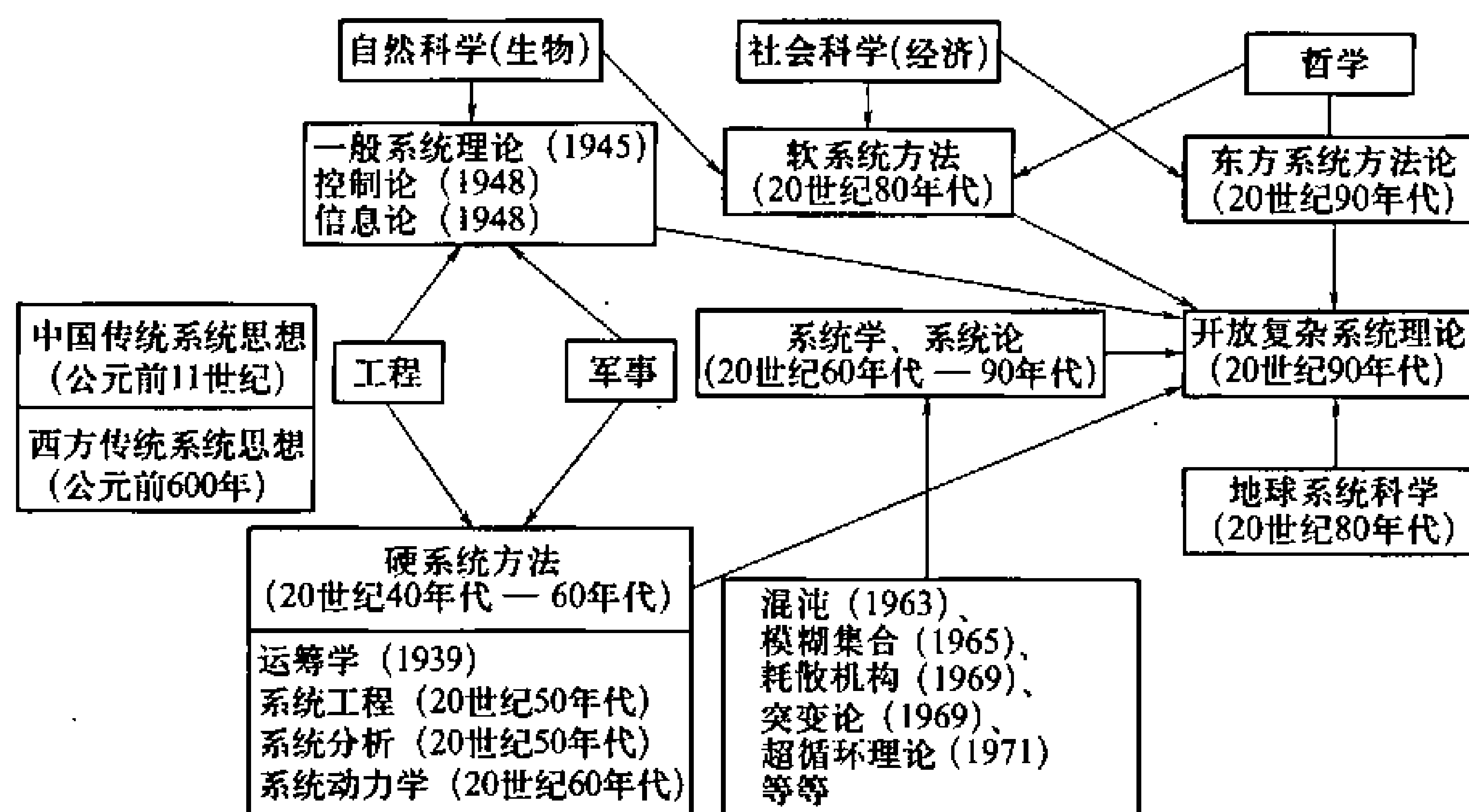


图1.32　系统运动图

WSR是"物理(Wuli)—事理(Shili)—人理(Renli)方法论"的简称,是中国著名系统科学专家顾基发教授和朱志昌博士于1994年提出的。它既是一种方法论,又是一种解决复杂问题的工具。在观察和分析问题时,尤其是观察分析复杂特性的系统时,WSR体现其独特性,并具有中国传统的哲学思辨,是多种方法的综合统一;根据具体情况,WSR将方法组群条理化、层次化,起到化繁为简的功效;属于定性与定量分析综合集成的东方系统思想,见表1.6。

表1.6　物理—事理—人理系统方法论内容

	物　理	事　理	人　理
对象与内容	客观物资世界、法规、规划	组织、系统管理和做事的道理	人、群体、关系、为人处世的道理
焦点	是什么？功能分析	怎么做？逻辑分析	最好怎么做？可能是？人文分析
原则	诚实;追求真理	协调;追求效率	讲人性、和谐;追求成效
所需知识	自然科学	管理科学、系统科学	人文知识、行为科学

1）WSR系统方法论的工作过程

WSR系统方法论的工作过程如图1.33所示。

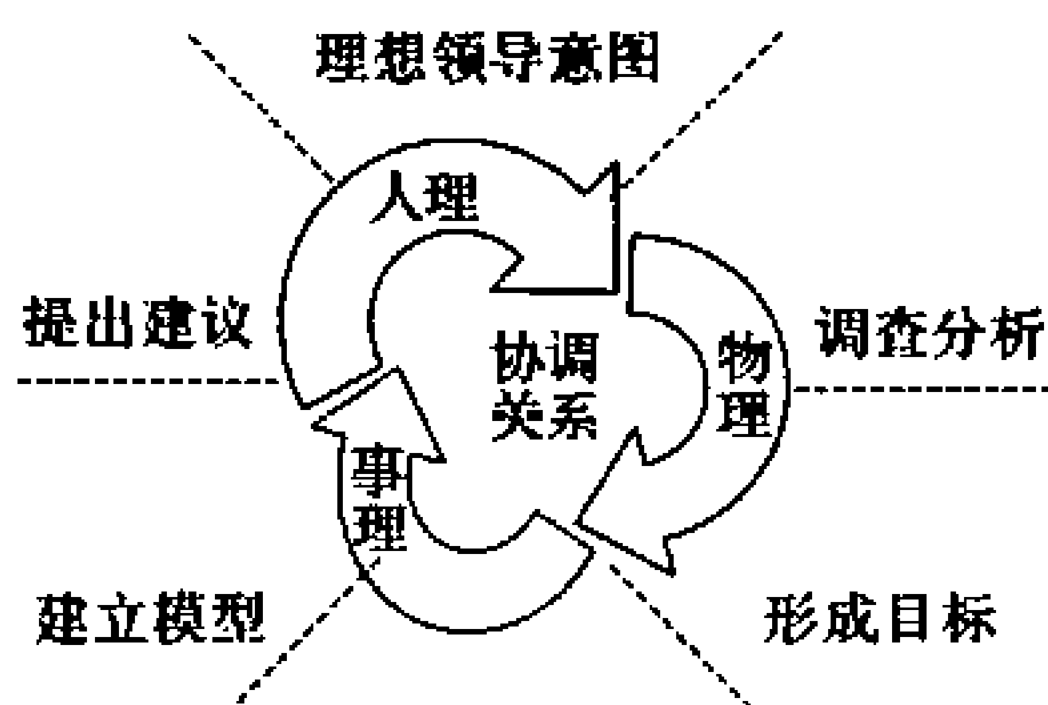


图 1.33　WSR 系统方法论的工作过程

(1) 理解领导意图。目前，做任何一个项目，如果上来就摆开一种对着干的架势，那么你就无从获取项目资金以至有关数据和信息。当然，应该提倡物理、事理和人理一体考虑，通过调查物理情况，用科学方法分析、预测可能的利弊，一个明事的领导或上级会改变原来不切实际的看法，同时只有对事物仔细分析后下的结论才会令人信服。这里的领导是广义的，可以是管理人员和技术决策人员，也可以是一般用户、顾客。把顾客看成上帝，提出种种方法去了解顾客的意图和需求，把用户参与、用户满意作为设计系统的重要原则。

(2) 调查分析。这是一个物理分析过程。任何结论只能在经过仔细的情况调查之后做出。深入实际和邀请有实践经验的专家提出意见和看法是至关重要的，这主要需要“物理”。

(3) 形成目标。对于一个复杂问题，往往一开始问题拟解决到什么程度，领导和系统分析工作者都不是很清楚。开始是领导的笼统意图，经过调查后，问题到底能解决到什么程度，应有一初步共识，这就是形成目标的过程。这些目标与当初领导的意图会有不一致的地方，同时在以后大量分析和进一步考虑后，可能还会有所改变。

(4) 建立模型。这里的模型是比较广义的，数学模型是其中一种，还可以是概念模型，甚至是一套可以运作的步骤（如程序，行动顺序），但它们是经过人们的抽象、理智，包括合乎情理的思考后形成的，这个过程主要是运用“事理”。

(5) 协调关系。在处理问题时，由于不同人所拥有的知识不同、立场不同、利益不同，对同一问题、同一个目标、同一个方案往往会有不同的看法和感受，因此往往需要协调，这里“人理”是主要的。有时一个方案只是由于告诉人的次序、时间和地点有所不同，就会造成不同的后果。

(6) 提出建议。在对物理、事理和人理综合分析后，应提出解决问题的建议。建议一要可行，二要尽可能使各方面满意（有时需要妥协和折衷），最后还要让领导从更高一个层次去综合和权衡，决定是否采用。系统工程人员有时会错误地认为，成功的分析就是建议被全部采用。其实，分析结果或建议能使领导改变初衷，或者改变原来要解决的问题，也是一种成功。作为系统工程人员应尽量考虑到实

施中可能出现的问题，提出的建议既要合理还要合情，但是，系统工程人员不是决策者和实际执行者，主要是起参谋作用。

以上这些步骤有时需要反复进行，也可以将有些步骤提前进行。

2）WSR 系统方法论常用的方法

WSR 系统方法论常用的方法见表 1.7。

表 1.7 WSR 系统方法论常用的方法

	物理	事理	人理	方法
理解意图	了解顾客最初意图，通过谈话和收集有关领导讲话	了解顾客对目标的偏好，喜欢什么模型和评价结果的标准	了解有哪些领导会参与决策，谁来用这个结果	智暴法，讨论会，认知图，等等
调查分析	主要调查现在已有资源和制约条件，主要通过现场调查和文件检索	了解用户的经验和知识背景	了解谁是真正的决策者，哪些知识是必需的，弄清用户上下各种关系哪些是必要的	Delphi 法、各种调查表、文献调查、历史对比
形成目标	将所有可行的和实用的目标准则，以及约束条件都列举出来	要在目标中弄清它们的优先次序和权重	最好弄清各种目标涉及的人物	智暴法，目标树，统一计划规划
建立模型	将各种有关目标和约束条件数据化或规格化	要选择合适的模型、程序和知识	尽量把领导的意图放入模型中	各种建模方法和工具
协调关系	要使所有模型、软件、硬件、算法和数据之间加以协调或称技术协调	要对模型和知识的合理性加以协调或称知识协调	工作过程中，各方面不同的利益、观点、关系都可能引起冲突，需要进行利益协调	和谐理论，亚对策，超对策
提出建议	要对各种物理设备和程序加以安装、调试、验证，创造好的汇报、演示条件	要将各种专业术语改成用户能懂的和喜欢的语言	要尽量让各方面易于接受、易于执行，并考虑到今后能否合法运用该建议	各种统计图表，统筹图

1.3.3 系统工程方法论的结构和过程

1.3.2 节全面回顾和分析了几种典型的系统工程方法论，通过对比总结各种系统工程方法论的逻辑结构和方法步骤，本书作者认为系统工程方法论的基本逻

辑程序应该分为 7 个部分，即：

(1) 辨识环境，明确问题；

(2) 确立目标，指标设计；

(3) 价值度量，评价标准；

(4) 构建系统，给出多个解决方案；

(5) 分析判别方案优劣及对环境变化的适应情况；

(6) 确定方案排序，提出建议方案；

(7) 提出决策及对决策方案的实施计划管理。

系统工程方法论的 7 个基本逻辑程序，又称为辩证程序。

系统工程辩证程序不是系统工程过程。系统工程过程是由很多工作阶段和子阶段组成的，方法论是解决问题的方法上的辩证过程，系统工程过程中每一个阶段都需要运用这一辩证过程，以至每一个阶段的个别问题也需要用这一辩证程序来解决。对于系统工程人员来说，最重要的工作之一就是运用系统工程方法论把问题展开，提供给相应的工程技术人员去解决，即提出问题和给出问题的环境设定。

上面所列出的各个辩证步骤只是表达了系统工程方法论的基本结构，从过程方面来看，系统工程方法论的过程如图 1.34 所示。

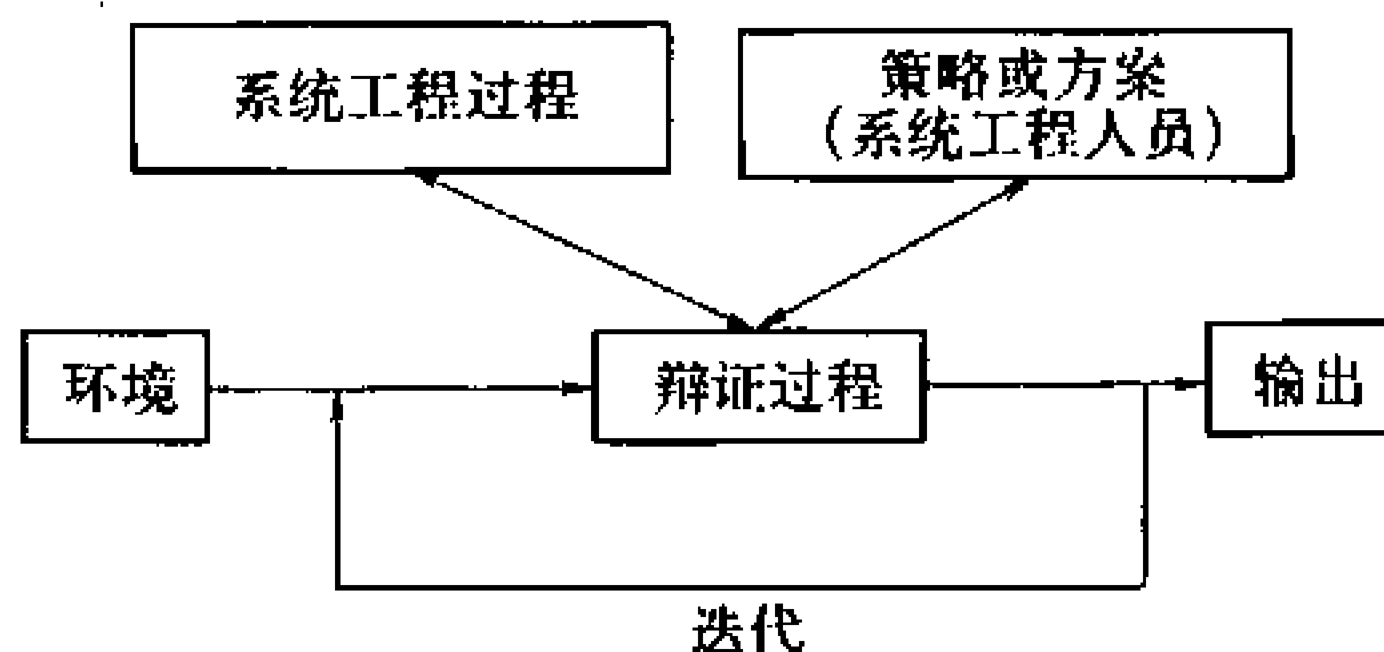


图 1.34　系统工程方法论的过程图

这个过程与一般自动化过程不同，最重要的一点是它始终要在具有系统工程观念和所涉及的专业人员的干预下进行，由系统工程人员提供新的概念、策略和方案，这些都是创造性活动。

这一辩证程序需要系统工程人员和决策者之间的沟通和对话。各个环节和阶段都需要决策者的建议和判断。而且，不断对话意味着决策者考虑了问题的各个方面，感到亲自参与了系统工程过程，容易接纳分析结论，不致于因出乎意料而拒绝。系统工程需要专业技术问题和组织体制、行为因素相结合，逻辑推理和直感判断相结合，定性和定量分析相结合，这将体现在上述的各个行动环节中。

在上述辩证程序中，每个行动环节一次即顺利完成的可能性是很小的，需要在反馈信息的基础上反复进行。分析者研究每一环节输出的中间结果或最后阶段的

结果后，都可能改变最初的设想，或收集更多的信息以修正原先的结果。例如，决策者在弄清方案的后果以前，往往难以有把握地提出某项目标，在发现某些后果后有可能增加约束条件，筛选备选方案，调整方案的政策参数等。

1.3.4 系统工程方法论的子结构框

在系统工程方法论的辩证程序中，常常还要用到一些更基础的辩证概念，如描述、评价等，对于这些概念的辩证程序称之为方法论的结构子框。

描述子框用来描述对问题的辨识过程，原来主要是为系统工程方法论的第一个环节——“辨识环境”服务的，然而从一般意义上来讲它有普遍性，因为思考一开始总是要辨识问题的环境。这就要描述主题、因素、结构和关系，描述子框如图 1.35 所示。

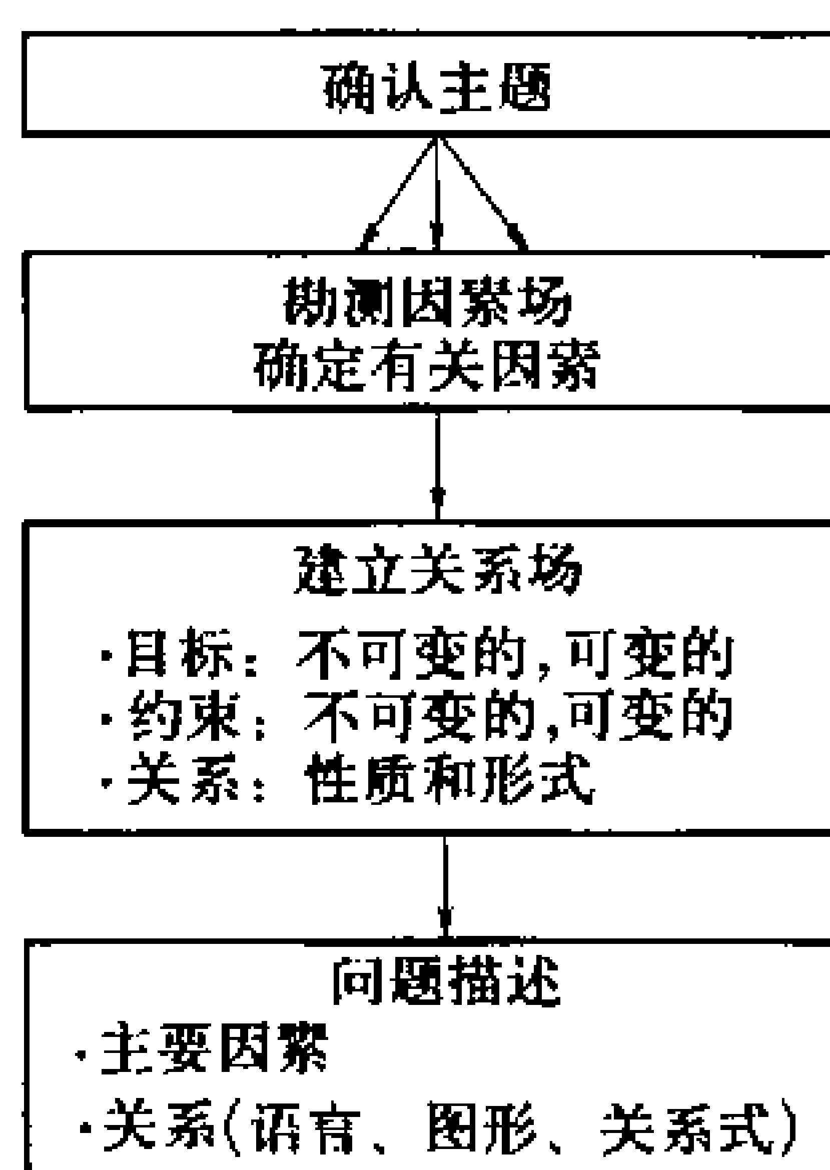


图 1.35 描述方法论子框

整个程序是首先确认所研究问题的主题。第二步汇集并建立起各种有关因素，即展示因素场。第三步建立各种因素之间的关系，从这些关系中识别出主要因素和对主题作进一步的阐明，如确定目标的不变因素和可变因素以及约束的不变因素和可变因素等。最后一步是审定一个主要因素网，在一般情况下，可以用文字、图形给出，最好是能得到定量化的关系式。

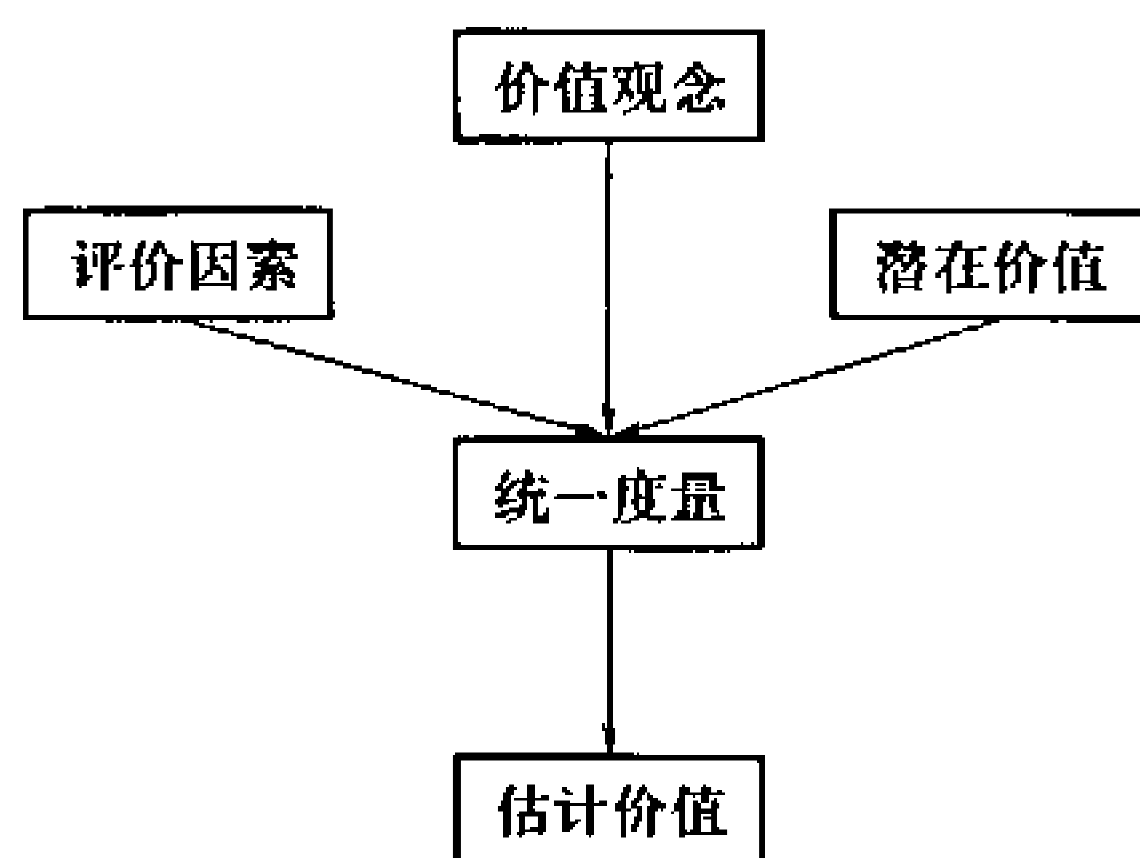


图 1.36 价值方法论子框

价值方法论子框如图 1.36 所示。它的作用是用来做出价值评定，为此首先要了解和确认问题所涉及的社会各界的价值概念，还要确定各种价值因素和潜在价值，第二步是做出评价的统一度量，第三步是

估计各种方案或活动的价值。

这种类型的方法论子框，在系统工程方法论中的作用是：逐步使一些认识上不清晰的、粗糙的东西过渡到明白的、确定的问题，从而将方法论结构和解决问题的技术手段联系在一起。

1.3.5 数量化与优化问题

数量化虽然不是辩证程序的一个环节，然而与这一程序的进行有密切关系。数量化问题是在决策辩证环节中提出来的，数量化能给出明确数量的结果，便于使用数学方法和计算技术设备，并能揭示出直观所不能表达的一些关系。

与数量化决策方法相对应的是靠个人的决断做出决策的方法，即依靠决策者个人的丰富经验和智慧以及对问题的洞察力来做决策，这称为素质决策。

无论采用哪一种决策方法，都不会影响更不能代替需要依据系统工程原理去开发的想象能力、创造能力与提出如何去做的能力，这一点应十分清楚。数量化的优点在于能给出明确的数量结果，能利用计算机去做，方便交流，又能直观地显示出看不到的关系，从而可以有效地帮助我们提出更好的方案和策略。

能否使用数量化方法取决于若干因素，诸如有一些问题涉及一些不易量化的因素，或者涉及很难量化的数量关系，以及系统工程人员不具备进行数量化分析的素质。

系统工程研究涉及工程的全过程，但实际工作职责上，工程的建造活动分为三级。第一级研究与发展，这是系统工程人员所做的。第二级系统结构分析和设计，也称参量化设计，这是系统工程人员和工程技术人员共同来做的。第三级工程技术设计和制造，这是工程技术人员所做的。

由于这种情况，在系统的研究与发展工作阶段，没有确定的数学手段，更不可能只用一种类型的数学模型，需要系统工程人员依靠对问题性质的理解、对任务目标的理解、对各种数学手段掌握的水平以及对所占有的可供数学处理用的资源来决定所用数学手段。

系统工程的上述特点和现实情况应当充分注意，应努力将两种决策方法结合起来并给以恰当的使用，而不能认为数量决策是科学的，素质决策是不科学的。著名数学家、运筹学创建人之一 P・M・莫尔斯写道："为什么把数量决策的结果称为做决定所需的'资料'，是指这些数量特征在多数情况下并不是作决定所需要的全部内容，作出一个决定还应考虑到其他因素：政治、士气、习惯等，它们往往是重要的，但无法用数量表示。"

上述情况表明，在系统工程研究中，亟待发展一些能有效地处理大量信息的方法，以及特别是能与人的创造性思维相统一的方法，这种方法大致能描述和辨识人的概念。

优化实质上是一个在更限定的条件下的决策问题，用以决定设计或策略的最好参数。正如福克斯(R. L. Fox)在其所著《工程设计的优化方法》一书中所指出的：

"优化不可能给出工程问题的创新解法，只能在预定的设计限制下去优化预定的方案，即改善某些参数和局部环节。确认设计目标、限制、系统组态，需要设计人员的洞察力和才能。"从这里可以看到优化技术在系统工程过程中的作用。在工程开发过程中，依据系统工程观念建立起来各种方案和策略的概念，并运用系统工程方法论对这些策略和方案进行辩证，从而完成了问题的环境设定，然后再运用优化技术求出方案或策略的更确切结果。在这一求解过程中，一方面得到求解的结果，另一方面要不断地汇集和评价可能增加的各种信息，使得能提出改进的方案或策略，这是一个闭环过程。这个过程要迭代多次，以期待得到更适当的方案和策略。

参考文献

[1] 刘兆世. 航天与系统工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2006.

[2] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室. 现代汉语词典[M]. 北京:商务印书馆,1983.

[3] 钱学森. 大力发展系统工程,尽早建立系统科学的体系[N]. 光明日报,1979-11-10.

[4] 许国志. 系统科学[M]上海:上海科技教育出版社,2000.

[5] 许国志. 系统研究[M]. 杭州:浙江教育出版社,1996.

[6] 陈宏民. 系统工程导论[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[7] 孙东川,林福永. 系统工程引论[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[8] 汪应洛. 系统工程理论、方法与应用[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2002.

[9] 肖艳玲. 系统工程理论与方法[M]. 北京:石油工业出版社,2002.

[10] 周德群,等. 系统工程概述[M]. 北京:科学出版社,2005.

[11] 恩格斯. 路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结[M]. 中共中央马克思列宁恩格斯斯大林著作编译局,译. 北京:人民出版社,1997.

[12] 喻湘存,熊曙初. 系统工程教程[M]. 北京:北京交通大学出版社,2006.

[13] 薛华成. 管理信息系统[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2003.

[14] 钱学森,宋健. 工程控制论[M]. (修订本). 北京:科学出版社,1980.

[15] 钱学森,等. 论系统工程[M]. (修订本). 长沙:湖南科学技术出版社,1988.

[16] 钱学森,于景元,涂元季. 创建系统学[M]. 太原:山西科学技术出版社,2001.

[17] 钱学森书信选编辑组. 钱学森书信选[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

[18] 孙东川. 管理系统的效率与可靠性问题[J]. 管理现代化,1984(2).

[19] 丹尼斯·舍伍德. 系统思考[M]. 丘昭良,刘昕,译. 北京:机械工业出版社,2008.

[20] 耿艳栋. 军事航天系统工程[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[21] 杜玠,陈庆华. 系统工程方法论[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1992.

[22] 中国大百科全书[M]. 简明版. 北京:中国大百科全书出版社,1999.

[23] 三浦武雄,等. 现代系统工程学概念[M]. 郑春瑞,译. 北京:中国社会科学出版社,1983.

[24] 寺野寿郎. 系统工程学[M]. 张宏文,译. 北京:机械工业出版社,1980.

[25] 高志亮,李忠良. 系统工程方法论[M[. 西安:西北工业大学出版社,2004.

[26] 曹光明. 硬系统思想与软系统方法论的比较[J]. 系统工程理论与实践,1994(1).

[27] 陈庆华. 装备运筹学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[28] 陈学楚. 装备系统工程[M]. 北京:国防工业出版社,1995.
[29] 陈思录. 系统工程[M]. 重庆:重庆大学出版社,1993.
[30] 车宏安. 软科学方法论研究[M]. 上海:上海科技文献出版社,1995.
[31] 顾培亮. 系统分析与协调[M]. 天津:天津大学出版社,1998.
[32] 高军,赵黎明. 系统方法论研究的现状分析与展望[J]. 系统辩证学学报,2003(3).
[33] 花禄森,等. 系统工程与航天系统工程管理[M]. 北京:中国宇航出版社,2007.
[34] 胡久消. 系统科学[M]. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[35] 胡保生,彭勤科. 系统工程原理与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
[36] 黄梯云,李一军. 管理信息系统[M]. (修订本). 北京:高等教育出版社,2002.
[37] 贺建勋. 系统建模与数学模型[M]. 福州:福建科学技术出版社,1995.
[38] 霍兰约翰 H. 隐秩序—适应性造就复杂性[M]. 周晓牧,韩晖,译. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[39] 福莱斯特 JW. 系统学原理[M]. 杨通谊、黄午阳,杨世缙,译. 上海:上海市业余工业大学,1982.
[40] 刘龄德. 系统工程基础[M]. 北京:中央广播电视大学出版社,1985.
[41] 林福永. 一般系统结构理论[M]. 广州:暨南大学出版社,1998.
[42] 吕永波,胡天军,雷黎. 系统工程[M]. 北京:北京交通大学出版社,2003.
[43] 马小平,高明波. 军事物流系统工程[M]. 北京:中国经济出版社,2001.
[44] 切克兰德. 系统论的思想与实践[M]. 左晓斯,史然,译. 北京:华夏出版社,1990.
[45] 孙东川,陆明生. 系统工程简明教程[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1987.
[46] 孙东川. Hall 模型与系统工程专业[J]. 系统工程,1985(1).
[47] 孙东川. 系统工程的使命[J]. 华东工学院学报,1992(12).
[48] 孙东川. 软科学研究的方法与模型体系[J]. 华东工学院学报(哲社版). 1990(1).
[49] 孙东川. 系统管理的一项基本原则:宏观控制,微观搞活[J]. 南京理工大学学报,1996(4).
[50] 谭跃进,陈英武,易进先. 系统工程原理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999.
[51] 佟春生,等. 系统工程的理论与方法概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
[52] 董肇君. 系统工程与运筹学[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2007.
[53] 吴彤. 自组织方法论研究[M]. 北京:清华大学出版社,2001.
[54] 王寿云,等. 开放的复杂巨系统[M]. 杭州:浙江大学出版社,1996.
[55] 汪应洛. 系统工程[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2003.
[56] 汪树玉、刘国华. 系统分析[M]. 上海:浙江大学出版社,2001.
[57] 夏绍玮,杨家本,杨振斌. 系统工程概论[M]. 北京:清华大学出版社,1995.
[58] 许国志. 系统科学与工程研究[M]. 2 版. 上海:上海科技教育出版社,2000.
[59] 许国志. 诸侯分治,统一江山[J]. 科学时报,1999(11).
[60] 许国志. 怎样学习系统工程——答读者问[J]. 系统工程理论与实践,1985(1).
[61] 徐克绍. 系统工程原理与方法[M]. 上海:上海科技普及出版社,1996.
[62] 杨家本. 系统工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2002.
[63] 杨林泉. 管理系统工程[M]. 广州:暨南大学出版社,2004.
[64] 赵晓康、王维红. 论当代系统思想最新发展与演变趋势[J]. 系统辩证学学报,2002(2).
[65] 张延欣,吴涛,王明涛,等. 系统工程学[M]. 北京:气象出版社,1997.
[66] 张文泉. 系统科学方法论及其新进展[J]. 现代电力,1999(1).
[67] Geoffrey Gregory. Decision Analysis[M]. London: Pitman Pullishing,1988.
[68] Bunn Derek W. Applied Decision Analysis[M]. New York: McGraw-Hiu Book Company,1984.

第2章　系统工程常用的运筹学方法

在国家经济和军队建设的系统工程项目中，往往需要进行合理的规划和安排，使系统在满足期望要求的前提下，尽可能地降低成本，进而达到目标的最优解。作为系统科学中技术基础理论之一的运筹学，是从系统总体角度寻求系统最优解的数学工具，它包括数学规划、图与网络、决策分析、排队论、库存论、对策论等。本章将针对系统工程的有关问题介绍常用的运筹学方法，重点是单目标线性规划和多目标规划。

系统工程在军事装备领域的应用主要是解决装备全寿命期管理活动中的决策优化问题，而决策优化即是寻求合理有效的军事资源运用方案或使方案得到最大的改进。例如，假设已经遴选出若干个准备发展的武器装备型号，并且对每种型号的武器装备来说，已知其研制所需要的各种资源数量，已知其在装备部队以后的一定时期内对我军整体作战能力的贡献，问：对每种武器装备各生产多少数量，才能对我军整体作战能力贡献最大？一般地，将关于资源的限制称为约束条件，将对整体作战能力的贡献称为目标。定量化的约束条件通常用约束不等式表示，定量化的目标通常用目标函数表示。当目标函数与约束不等式都是决策变量的线性表达式时，该优化问题称作线性规划问题；一般来说，如果要求决策变量为正整数，则称作整数线性规划问题；如果进而要求决策变量的取值为0或1，则称作0—1要求的线性规划；当目标函数与约束不等式中至少有一个是非线性表达式时，称作非线性规划问题。当目标不止一个时，则称作多目标规划问题。

2.1　线性规划

2.1.1　线性规划问题的提出

先来看一个例子[1]。

[例2.1]　在装备发展论证中，已确定研制甲乙两种大型武器系统，已知每生产一套甲种武器系统需消耗材料2个单位，消耗能源2个单位，可提高战斗力指数3个单位；每生产一套乙种武器系统需消耗材料3个单位，消耗能源1个单位，可提高战斗力指数2个单位。现有材料10个单位，能源6个单位：安排研制甲乙武器系统各多少套，才能最大限度地提高总的战斗力指数？

分析:在这个问题中,军事资源是材料和能源,目的是寻求一个合理有效的运用方案,使总效益最好。首先引入决策变量,设甲乙两种武器系统各安排生产 x_1 套、x_2 套。根据问题中对目标和约束的描述,当不考虑整数要求时,构建该问题的数学模型如下:

$$\max f = 3x_1 + 2x_2 \tag{2.1}$$

满足

$$2x_1 + 3x_2 \leqslant 10 \tag{2.2}$$

$$2x_1 + x_2 \leqslant 6 \tag{2.3}$$

$$x_1, x_2 \geqslant 0 \tag{2.4}$$

其中:式(2.1)称作目标函数,式(2.2)与式(2.3)称作约束不等式,式(2.4)称作非负要求。把满足式(2.2)~式(2.4)的一组变量的取值称作问题的一组可行解。在所有可行解中使得式(2.1)取得最大值的那一组可行解,称作问题的最优解。当然最优解可能不只一个,一般情况下,如没有特殊要求,只要求出一个最优解即可。

线性规划的定义如下。

[定义 2.1] 在满足一组线性约束条件(线性等式或线性不等式)的若干决策变量组中,寻找能使线性目标函数(决策变量的线性表达式)达到最优(最大或最小)的数学问题,称为线性规划问题。线性规划问题的一般模型如下:

$$\max f = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leqslant b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leqslant b_2 \\ \cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leqslant b_m \\ x_1, x_2, \cdots, x_n \geqslant 0 \end{cases}$$

对于例 2.1,由约束不等式(2.2)和不等式(2.3)就可得知 $x_1 \leqslant 3, x_2 \leqslant 3$ 。

如果能把所有满足约束条件的可行解全部枚举出来,分别计算它们的目标函数值,然后比较,选一个最优的就可以了。由 $x_1 \leqslant 3$, $x_2 \leqslant 3$,所有满足约束不等式的决策变量的整数取值可以很容易地全部枚举出来,见表 2.1。

表 2.1 全部可行解的枚举表

序号	x_1 取值	x_2 取值	耗材 $2x_1 + 3x_2 \leqslant 10$	耗能 $2x_1 + x_2 \leqslant 6$	目标值 $3x_1 + 2x_2$
1	0	0	0	0	0
2	0	1	3	1	2
3	0	2	6	2	4

(续)

序号	x_1 取值	x_2 取值	耗材 $2x_1+3x_2 \leq 10$	耗能 $2x_1+x_2 \leq 6$	目标值 $3x_1+2x_2$
4	0	3	9	3	6
5	1	0	2	2	3
6	1	1	5	3	5
7	1	2	7	4	7
8	1	3	—	—	—
9	2	0	4	4	6
10	2	1	7	5	8
11	2	2	10	6	10
12	2	3	—	—	—
13	3	0	6	6	9
14	3	1	9	—	—
15	3	2	—	—	—
16	3	3	—	—	—

从表2.1可以看出,当 $x_1=2,x_2=2$ 时,目标值达到最优。

除了采用枚举法以外,还可以采用直角坐标系下的图像法来求解只有两个决策变量的线性规划问题。

建立一个直角坐标系,将变量 x_1 作为横坐标,将变量 x_2 作为纵坐标。在这一直角坐标系作出直线:

$$\begin{cases}2x_1+3x_2=10\\2x_1+x_2=6\end{cases}$$

然后确定可行解所在的区域,这个可行域是由4条直线所围成的:$2x_1+3x_2 \leq 10$,$2x_1+x_2 \leq 6$;另外,$x_1 \geq 0$,$x_2 \geq 0$ 是指在平面的第一象限内。可行域如图2.1阴影部分所示。然后作出直线 $3x_1+2x_2=0$。

希望目标函数 $f=3x_1+2x_2$ 的值越来越大,只需将直线 $3x_1+2x_2=0$ 向着第一象限平行地移动即可。当直线平行移动到可行域的边界处 P 点时,目标函数值达到最优。P 点是直线 $2x_1+3x_2=10$ 与直线 $2x_1+x_2=6$ 的交点,交点的坐标所对应的 x_1,x_2 的取值就是最优的可行解,$x_1=2,x_2=2$。

由这个例子可看出,线性规划的可行域是一个凸多边形,凸多边形的顶点称作线性规划的可行域的极点,每一个极点都是至少两个约束不等式所对应的直线的交点。

如果可行域是非空且有限的,那么线性规划问题一定存在最优解,而且最优解

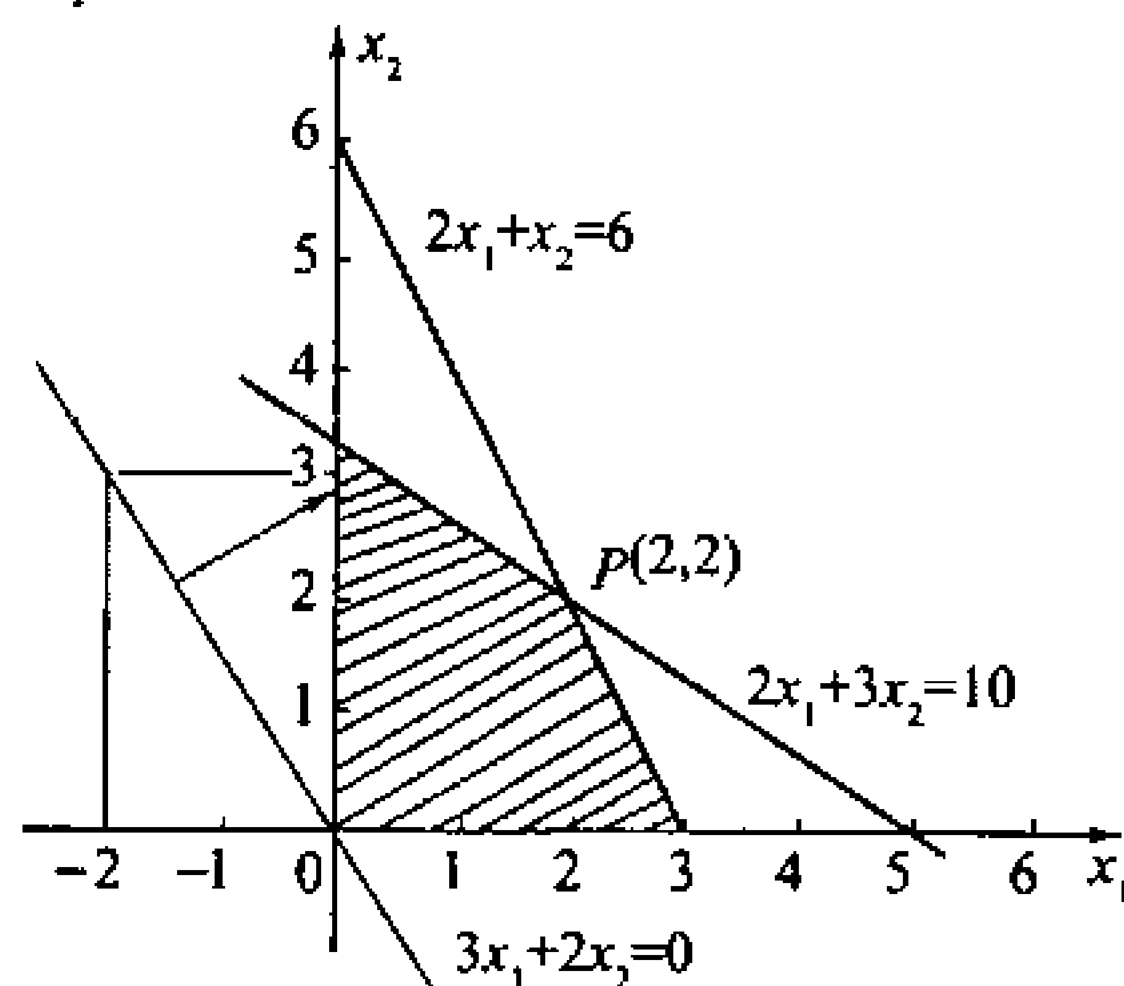


图 2.1 可行域与最优解

一定在极点上达到。只要枚举出线性规划的可行域的所有极点，比较目标值，即可得到线性规划问题的最优解。

对于多于两个决策变量的线性规划问题，不能用图像法求解，如果可行解的个数是有限的，理论上可以采用枚举法求解；由于可行解数目太多，而无实际价值。下面探讨一种新的算法。

2.1.2 线性规划的"定界对偶算法"

前面给出了线性规划求解方法的描述，现在对这一算法进行理论上的进一步探讨。假设，所讨论的线性规划都是变量，具有上下界限制，非负要求的线性规划[1]。这种假设是合理的，因为在装备领域各项资源运用活动中，资源总是有限的。

设给出下列称作标准形式的线性规划问题，简称 LP1 问题。

$$\max f = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n \tag{2.5}$$

满足

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n = b_2 \\ \cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m & (2.6) \\ u_i \geqslant x_i \geqslant v_i \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,n & (2.7) \\ x_i \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,n & (2.8) \end{cases}$$

其中：式(2.5)称作目标函数，式(2.6)称作约束方程，式(2.7)称作上下界限制，式(2.8)称为非负要求。这里，$c_1,c_2,\cdots,c_n$ 称作目标函数中决策变量的系数；$b_1,b_2,\cdots,b_m$ 称作约束不等式的常数项；而 $a_{11},a_{12},\cdots,a_{mn}$ 称作约束不等式中决策变量的系数；所有这些 c_j,b_i,a_{ij} 都是已知的常数。其中约束方程的系数矩阵

$$A=\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

是一个 $m\times n$ 阶矩阵，设矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的秩为 $m, m<n$。不妨设 $\boldsymbol{A}$ 中与 $x_{B_1}, x_{B_2}, \cdots, x_{B_i}, \cdots, x_{B_m}$ 等 m 个变量对应的 m 个列向量线性无关，则可以将这 m 个变量"解"出来，也就是它们可以写成其他 $n-m$ 个变量的线性表达式。再将这些表达式代入式(2.5)，可以得到目标函数用这 $n-m$ 个变量的线性表达式。将 $x_{B_1}, x_{B_2}, \cdots, x_{B_m}$ 称作基变量，而将其余 $n-m$ 个变量称作非基变量；用 R 表示这些非基变量的下标所组成的集合，从而有

$$\max f = y_{00} + \sum_{j\in R} y_{0j}x_j \tag{2.9}$$

满足

$$\begin{cases} x_{B_1} = y_{10} + \sum_{j\in R} y_{1j}x_j \\ x_{B_2} = y_{20} + \sum_{j\in R} y_{2j}x_j \\ \cdots \\ x_{B_i} = y_{i0} + \sum_{j\in R} y_{ij}x_j \\ \cdots \\ x_{B_m} = y_{m0} + \sum_{j\in R} y_{mj}x_j \end{cases} \tag{2.10}$$

在目标函数的表达式(2.9)中，又称非基变量 x_j 的系数 y_{0j} 为非基变量 x_j 的检验数。

可行解：如果一组变量的取值 $\bar{x}=(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_n)$ 满足式(2.6)～式(2.8)，则称 $\bar{x}$ 为 LP1 的一组可行解。

基本解：如果一组变量的取值 $\bar{x}=(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_n)$，可以写成式(2.10)的形式，则称 $\bar{x}$ 为 LP1 的一组基本解。如果一组基本解又满足式(2.7)和式(2.8)，则称 $\bar{x}$ 为 LP1 的一组基可行解。

设 $\bar{x}=(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \cdots, \bar{x}_n)$ 是 LP1 的一组基本解，如果每个非基变量 $x_j(j\in R)$ 都取其下界值 v_j，或取其上界值 u_j；并且当 x_j 取下界值时，该非基变量 x_j 在目标函数表达式(2.9)中的系数 $y_{0j}\leqslant 0$；当 x_j 取上界值时，该非基变量 x_j 在目标函数表达式(2.9)中的系数 $y_{0j}\geqslant 0$；则称该基本解为 LP1 的正则解，也就是说，在正则解中，取下界值的非基变量 x_j，其检验数 $y_{0j}\leqslant 0$；取上界值的非基变量 x_j，其检验数 $y_{0j}\geqslant 0$。用 R_1

表示取下界值的非基变量的下标集合，用 R_2 表示取上界值的非基变量的下标集合。则式(2.9)和式(2.10)可以写成该正则解所对应的表达式：

$$f = y_{00} + \sum_{j \in R_1} y_{0j} x_j + \sum_{j \in R_2} y_{0j} x_j \tag{2.11}$$

$$x_{B_i} = y_{i0} + \sum_{j \in R_1} y_{ij} x_j + \sum_{j \in R_2} y_{ij} x_j, \quad i = 1,2,\cdots,m \tag{2.12}$$

其中

$$y_{0j} \leqslant 0, \quad j \in R_1$$

$$y_{0j} \geqslant 0, \quad j \in R_2$$

这是一个初始的基本正则解，将式(2.11)、式(2.12)填入表2.2。

表 2.2　初始解的基本正则解

正则解	常数列	x_j ⋮ (v_j) $j \in R_1$	(u_j) ⋮ x_j $j \in R_2$	取值列
$f =$	y_{00}	$+y_{0j}x_j(y_{0j} \leqslant 0)$	$+y_{0j}x_j(y_{0j} \geqslant 0)$	$y_{00} + \sum_{j \in R_1} y_{0j} v_j + \sum_{j \in R_2} y_{0j} u_j = \bar{f}$
…	…	…	…	…
$x_{B_i} =$	y_{i0}	$+y_{ij}x_j$	$+y_{ij}x_j$	$y_{i0} + \sum_{j \in R_1} y_{ij} v_j + \sum_{j \in R_2} y_{ij} u_j = \bar{x}_{B_i}$
$x_{B_r} =$	y_{r0}	$+y_{rj}x_j$	$+y_{rj}x_j$	$y_{r0} + \sum_{j \in R_1} y_{rj} v_j + \sum_{j \in R_2} y_{rj} u_j = \bar{x}_{B_r}$
…	…	…	…	…

如果表2.2中给出的一组基变量的取值，即取值列中给出的 $\bar{x}_{B_i}$ 满足

$$u_{B_i} \geqslant \bar{x}_{B_i} \geqslant v_{B_i}, \quad i = 1,2,\cdots,m$$

则这组基本解也是可行解，正则可行解就是最优解。

如果某个 $\bar{x}_{B_r}$ 不满足上下界限制，则进行迭代，迭代的规则如下。

(1) 如果 $\bar{x}_{B_r} < v_{B_r}$，则让 x_{B_r} 出基，出基后变成取下界值 v_{B_r} 的非基变量，进基变量的选取由下式确定：

$$\max\left\{\max_{j \in R_1}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} > 0\right\}, \quad \max_{j \in R_2}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} < 0\right\}\right\} = \frac{y_{0k}}{y_{rk}} \tag{2.13}$$

让 x_k 进基。这里约定，同种条件下优先取下界值的非变量。

迭代规则是，从下式中解出 x_k

$$x_{B_r} = y_{r0} + \sum_{j \in R_1} y_{rj} x_j + \sum_{j \in R_2} y_{rj} x_j$$

并将 x_k 的表达式代入式(2.11)和式(2.12)，得到一个新的正则解表达式。

(2) 如果 $\bar{x}_{B_r} > u_{B_r}$，则让 x_{B_r} 出基，出基后变成取上界值 u_{B_r} 的非基变量，进基变量的选取由下式确定：

$$\min\left\{\min_{j\in R_1}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} < 0\right\},\quad \min_{j\in R_2}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} > 0\right\}\right\} = \frac{y_{0k}}{y_{rk}} \tag{2.14}$$

让 x_k 进基。这里约定，同种条件下优先选取下界值的非基变量。

在表 2.2 中，出基行与进基列对应的位置上的系数 y_{rk} 称作这次迭代的枢纽元素。

迭代规则是，从 x_{B_r} 的表达式中解出 x_k，并将 x_k 的表达式代入式(2.11)和式(2.12)，得到一个新的正则解表达式。

[**定理 2.1**] 经过上述的一次迭代以后，目标函数值下降，且得到的仍然是一个基本正则解。

证明：需要证明以下 4 种情况。

(1) $\bar{x}_{B_r} < v_{B_r}$，x_k 原来属于取下界值的非基变量。

(2) $\bar{x}_{B_r} < v_{B_r}$，x_k 原来属于取上界值的非基变量。

(3) $\bar{x}_{B_r} > u_{B_r}$，x_k 原来属于取下界值的非基变量。

(4) $\bar{x}_{B_r} > u_{B_r}$，x_k 原来属于取上界值的非基变量。

只证明其中一种情况，其他情况类似证明。

设 $\bar{x}_{B_r} < v_{B_r}$，则由式(2.13)确定 x_k，而 x_k 是原来属于取下界值的非基变量，即有

$$\frac{y_{0k}}{y_{rk}} = \max_{j\in R_1}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} > 0\right\} \geqslant \max_{j\in R_2}\left\{\frac{y_{0j}}{y_{rj}}, y_{rj} < 0\right\} \tag{2.15}$$

由 x_{B_r} 的表达式，得

$$x_{B_r} = y_{r0} + \sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}} y_{rj}x_j + y_{rk}x_k + \sum_{j\in R_2} y_{rj}x_j$$

解出 x_k，有

$$-y_{rk}x_k = y_{r0} + \sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}} y_{rj}x_j - x_{B_r} + \sum_{j\in R_2} y_{rj}x_j$$

$$x_k = -\frac{y_{r0}}{y_{rk}} + \sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}} \frac{y_{rj}}{-y_{rk}}x_j + \frac{1}{y_{rk}}x_{B_r} + \sum_{j\in R_2} \frac{y_{rj}}{-y_{rk}}x_j \tag{2.16}$$

将式(2.16)代入式(2.11)，得

$$f = y_{00} + \sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}} y_{0j}x_j + y_{0k}x_k + \sum_{j\in R_2} y_{0j}x_j =$$

$$y_{00}+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}y_{0j}x_j+y_{0k}\left(-\frac{y_{r0}}{y_{rk}}+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}\frac{y_{rj}}{-y_{rk}}x_j+\frac{1}{y_{rk}}x_{B_r}+\sum_{j\in R_2}\frac{y_{rj}}{-y_{rk}}x_j\right)+\sum_{j\in R_2}y_{0j}x_j=$$

$$\left(y_{00}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{r0}\right)+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}\left(y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}\right)x_j+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}x_{B_r}+\sum_{j\in R_2}\left(y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}\right)x_j$$

对于新的基本正则解来说,其目标函数值为

$$\bar{\bar{f}}=\left(y_{00}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{r0}\right)+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}\left(y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}\right)v_j+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}v_{B_r}+\sum_{j\in R_2}\left(y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}\right)u_j=$$

$$y_{00}+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}y_{0j}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{0j}u_j-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{r0}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\left(\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}y_{rj}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{rj}u_j\right)+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}v_{B_r}=$$

$$y_{00}+\sum_{j\in R_1}y_{0j}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{0j}u_j-y_{0k}v_k-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\left(y_{r0}+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}y_{rj}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{rj}u_j\right)+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}v_{B_r}=$$

$$y_{00}+\sum_{j\in R_1}y_{0j}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{0j}u_j-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\left(y_{rk}v_k+y_{r0}+\sum_{\substack{j\in R_1\\ j\neq k}}y_{rj}v_j+\sum_{j\in R_2}y_{rj}u_j\right)+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}v_{B_r}=$$

$$\bar{f}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\bar{x}_{B_r}+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}v_{B_r}=\bar{f}+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}(v_{B_r}-\bar{x}_{B_r})$$

由于

$$y_{0k}\leqslant 0,\quad y_{rk}>0,\quad v_{B_r}-\bar{x}_{B_r}>0$$

所以

$$\frac{y_{0k}}{y_{rk}}(v_{B_r}-\bar{x}_{B_r})\leqslant 0$$

$$\bar{\bar{f}}=\bar{f}+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}(v_{B_r}-\bar{x}_{B_r})\leqslant\bar{f} \tag{2.17}$$

即对于新的基本解来说,目标函数值下降。

再来考查新的基本解在目标函数中新的非基变量的检验数。

新的基本解中,取上界值的非基变量没有变化,而其检验数由原来的 $y_{0j}\geqslant 0$,变成 $y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}$,当 $y_{rj}\geqslant 0$ 时,正确;当 $y_{rj}<0$ 时,有

$$y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}=y_{rj}\left(\frac{y_{0j}}{y_{rj}}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\right) \tag{2.18}$$

由于 $y_{rj}<0,\frac{y_{0j}}{y_{rj}}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\leqslant 0$,所以,新的基本解取上界值的非基变量在目标函数中的检验数仍大于或等于0。

然后考查新的基本解中,取下界值的非基变量在目标函数中的检验数。原来的取下界值的非基变量,其检验数由原来的 y_{0j} 变成 $y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}$,当 $y_{rj}\leqslant 0$ 时,正确;

当$y_{rj}>0$时，有

$$y_{0j}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}y_{rj}=y_{rj}\left(\frac{y_{0j}}{y_{rj}}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\right) \tag{2.19}$$

由于$y_{rj}>0,\frac{y_{0j}}{y_{rj}}-\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\leqslant 0$，所以新的基本解（原来取下界值的非基变量），其检验数小于或等于0。

至于新的基本解中，新变成的取下界值的非基变量x_{B_r}，其检验数是$\frac{y_{0k}}{y_{rk}}$，由于$y_{0k}\leqslant 0,y_{rk}>0$，所以其检验数$\frac{y_{0k}}{y_{rk}}\leqslant 0$，仍然满足要求，从而定理得证。

[定理2.2] 如果在迭代过程中，目标函数中所有非基变量的检验数都是非零的，则每次迭代都能保证目标函数值严格下降。

这是显然的，以情况(1)为例，因为新的正则解，其目标函数值有

$$\bar{\bar{f}}=\bar{f}+\frac{y_{0k}}{y_{rk}}(v_{B_r}-\bar{x}_{B_r})<\bar{f}$$

称检验数为零的情况为退化情况。在退化的情况下，一次迭代后，目标函数值并没有下降，而是保持不变。

由定理2.2可知，在非退化的情况下，目标函数值严格下降，而每次迭代都从一个基本解变到另一个基本解，由于基本解的个数是有限的，最多只有C_n^m个，所以，最多进行C_n^m次迭代，就能得到最优解，从而有下面定理。

[定理2.3] 在非退化的情况下，采用有限次迭代，可得到最优解；或者进行到某步，进基变量的候选集为空集，则说明原问题无解；或者目标函数的取值，随着迭代而趋于无穷，这时原问题的可行域无界。

上面给出了标准形式的线性规划LP1的求解方法与算法证明，但是对于具有实际军事应用背景的线性规划来说，不一定都具有LP1的形式，如下面所给出的LP2。

$$\min f=c_1x_1+c_2x_2+\cdots+c_nx_n$$

$$\text{满足}\quad\begin{cases}a_{11}x_1+a_{12}x_2+\cdots+a_{1n}x_n\leqslant b_1\\ a_{21}x_1+a_{22}x_2+\cdots+a_{2n}x_n\geqslant b_2\\ \cdots\\ a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+\cdots+a_{mn}x_n=b_m\\ x_1,x_2,\cdots,x_n\geqslant 0\end{cases}$$

由于LP2与军事资源有关，所以至少有一个约束不等式中系数全为正值，如$a_{11},a_{12},\cdots,a_{1n}>0$，从而确定出每个决策变量的上界限制，而且至少有下界限制0，从而得到LP1中的式(2.7)。

对目标函数表达式，乘以“ -1”，可将求“min”变为求“max”。

对于约束不等式，两端乘以“ -1”，可将“ ≥”变为“≤”。

对每个“≤”的约束不等式，增加一个人工变量，将不等式变成等式。

对每个“ =”的约束方程，由于至少有一个决策变量的系数不为0，如$a_{mn}\neq 0$，则可以“解”出这个决策变量，即将该决策变量写成其他变量的线性表达式，从而LP2可以写成如下形式：

$$\max f' = -c_1x_1 - c_2x_2 - \cdots - c_nx_n$$

$$\text{满足}\quad \begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n + x_{n+1} = b_1 \\ -a_{21}x_1 - a_{22}x_2 - \cdots - a_{2n}x_n + x_{n+2} = -b_2 \\ \cdots \\ \dfrac{a_{m1}}{a_{mn}}x_1 + \dfrac{a_{m2}}{a_{mn}}x_2 + \cdots + x_n = \dfrac{b_m}{a_{mn}} \\ \dfrac{b_1}{a_{1i}} \geqslant x_i \geqslant 0, \quad i = 1,2,\cdots,n \end{cases}$$

这即是形如LP1的标准形式的线性规划，根据这一形式很容易得到形如式(2.11)和式(2.12)，然后依据目标函数中决策变量的系数的符号，确定该决策变量x_j是属于取下界值的非基变量，还是属于取上界值的非基变量，最后填入表2.2中，得到了初始的基本正则解表格。

对于给定的一般线性规划问题，确定决策变量的上下界是求解的关键；通过不等式组的等价变形，可以得到更加精确的上下界；更加精确的上下界可以减少迭代次数；当然，为了获得更加精确的上下界，就需要花费更多的时间与精力；正确而不精确的上下界不会影响问题的最优解，只可能延长求解的过程，这样就为初始正则解的获得提供了本质上的方便。如果，一般线性规划问题，对某个决策变量可行域是无界的，可以设定该决策变量的上界是一个充分大的正整数；也就是说，给定一个“虚拟上界”。

现在总结一下这一算法的主要步骤。

(1) 定界。由于正确而不精确的上下界不影响求解的结果，可能增加迭代步骤，所以，为了减少迭代步骤，对于每一个决策变量都确定一个尽可能精确的上下界；当然，这就会增加对不等式组进行等价变形的工作量。手工计算时，就要权衡这两者之间的利弊。上机计算时，可不必在定界上花费时间，有时就用资源的总量作为决策变量的上界，下界都设为0；当然，某个变量x_i的上界也可设为一个充分大的上界u_i。

(2) 引入松弛变量，将不等式化为等式。

(3) 求解方程组，将基变量写成非基变量的表达式，代入目标函数，将目标函数也写成非基变量的表达式。

(4) 将基变量的表达式、目标函数的表达式填入初始的基本正则解表格。目

标函数的表达式中非基变量的系数为正时，该非基变量称为取上界的非基变量；反之，称为取下界的非基变量；系数为0时，可任意选定其为 +0，这时令其为取上界的非基变量，或者选定其为 -0，这时令其为取下界的非基变量。

（5）根据确定的非基变量的取值，在初始基本正则解表格上，计算基变量的取值。

（6）检查基变量的取值是否满足非负要求和上下界限制。如果所有基变量的取值都满足，则得到最优解；如果基变量 x_i 的取值不满足，则令 x_i 出基，选取进基变量进行迭代；如果进基变量的候选集合是空的，则原问题无解。

（7）计算结束。当得到最优解，或者判定原问题无解时，计算结束；当某些非基变量无上界时，在某一迭代过程中检查时发现，无论那些无上界的非基变量取多么大的数值，基变量的取值总满足非负要求和上下界限制，而目标函数的取值趋近于无穷大，这时原问题存在可行解，但无最优解，计算结束。

用例2.1描述这一算法。

由
$$\max f = 3x_1 + 2x_2$$

满足
$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 \leqslant 10 \\ 2x_1 + x_2 \leqslant 6 \\ x_1, x_2 \geqslant 0 \end{cases}$$

先将线性规划的不等式约束化为等式约束，引入两个人工变量 x_3, x_4，又称作松弛变量，得到下面的线性规划问题。

$$\max f = 3x_1 + 2x_2 \tag{2.20}$$

$$\begin{cases} 2x_1+3x_2+x_3=10 & (2.21) \\ 2x_1+x_2+x_4=6 & (2.22) \\ x_1, x_2, x_3, x_4 \geqslant 0 & (2.23) \end{cases}$$

现在考虑式(2.20)～式(2.23)所对应的线性规划问题，首先将其变形如下：

$$\max f = 0 + 3x_1 + 2x_2 \tag{2.24}$$

满足
$$\begin{cases} x_3 = 10 - 2x_1 - 3x_2 & (2.25) \\ x_4 = 6 - 2x_1 - x_2 & (2.26) \end{cases}$$

为了简便，省略了 $x_1, x_2, x_3, x_4 \geqslant 0$，但非负要求仍存在。这时，$x_3, x_4$ 为基变量，x_1, x_2 为非基变量。其中非基变量 x_1 的检验数为3，非基变量 x_2 的检验数为2。

由于非基变量 x_1, x_2 的检验数都大于0，算法开始时，首先令 x_1 取上界值3，令 x_2 取上界值3，并在目标函数中，x_1 的上面作一标记，记为 $\overset{(3)}{x_1}$，x_2 的上面作一标记，记为 $\overset{(3)}{x_2}$；将 $x_1 = 3, x_2 = 3$，代入式(2.25)和式(2.26)，得到 x_3 的取值 -5，得到 x_4

的取值 -3。

将上述计算结果列入表2.3。

表2.3　初始的基本正则解

正则解	常数项	(3) · x_1	(3) · x_2	取值
目标函数 f =	0	$+3x_1$	$+2x_2$	15
基变量 x_3 =	10	$-2x_1$	$-3x_2$	-5
基变量 x_4 =	6	$-2x_1$	$-x_2$	-3

由于 x_3 的取值为 -5,不满足非负要求,令 x_3 出基,变成取下值0的非基变量。非基变量的选取由下式确定:

$$\max\left\{\frac{3}{-2},\frac{2}{-3}\right\}=\frac{2}{-3}$$

确定 x_2 为进基变量。

在表2.3中,从 x_3 行所对应的约束方程中解出 x_2,并且将 x_2 的表达式代入目标函数 f 的表达式和 x_4 行所对应的约束方程,得

$$f=\frac{20}{3}+\frac{5}{3}x_1-\frac{2}{3}x_3$$

$$x_2=\frac{10}{3}-\frac{2}{3}x_1-\frac{1}{3}x_3$$

$$x_4=\frac{8}{3}-\frac{4}{3}x_1+\frac{1}{3}x_3$$

将迭代后的表达式列入表2.4中。

将 $x_1=3$, $x_3=0$ 代入表2.4中,分别求出目标函数 f,基变量 x_2,基变量 x_4 的取值,并填入表2.4中的最后一列。

表2.4　迭代后的基本正则解

正则解	常数项	(3) · x_1	x_3 · (0)	取值
目标函数 f =	$\frac{20}{3}$	$+\frac{5}{3}x_1$	$-\frac{2}{3}x_3$	$\frac{35}{3}$
基变量 x_2 =	$\frac{10}{3}$	$-\frac{2}{3}x_1$	$-\frac{1}{3}x_3$	$\frac{4}{3}$
基变量 x_4 =	$\frac{8}{3}$	$-\frac{4}{3}x_1$	$+\frac{1}{3}x_3$	$-\frac{4}{3}$

检查最后一列,基变量的取值是否满足非负要求和上下界限制。x_4 的取值不满足非负要求,令 x_4 出基,出基后变成取下界值 0 的非基变量。进基变量的选取由下式确定:

$$\max\left\{\frac{\frac{5}{3}}{-\frac{4}{3}},\frac{-\frac{2}{3}}{+\frac{1}{3}}\right\}=\left\{-\frac{5}{4}\right\}=-\frac{5}{4}$$

确定为 x_1 的进基变量。

在表 2.4 中,从 x_4 所对应的约束方程中解出 x_1,并且将 x_1 的表达式代入目标函数 f 的表达式和 x_2 行所对应的约束方程,得

$$f = 10 - \frac{5}{4}x_4 - \frac{1}{4}x_3$$

$$x_2 = 2 + \frac{1}{2}x_4 - \frac{1}{2}x_3$$

$$x_1 = 2 - \frac{3}{4}x_4 + \frac{1}{4}x_3$$

将迭代后的表达式列入表 2.5 中。

表 2.5　基本正则可行解

正则解	常数项	x_4 · (0)	x_3 · (0)	取值
目标函数 f =	10	$-\frac{5}{4}x_4$	$-\frac{1}{4}x_3$	10
基变量 x_2 =	2	$+\frac{1}{2}x_4$	$-\frac{1}{2}x_3$	2
基变量 x_1 =	2	$-\frac{3}{4}x_4$	$+\frac{1}{4}x_3$	2

将 $x_4=0,x_3=0$ 代入表 2.5 中,分别求出目标函数 f,基变量 x_2,基变量 x_1 的取值,并填入表 2.5 中的最后一列。

检查最后一列,基变量 x_2,x_1 的取值已经满足了非负要求和上下界限制,也就是当取一组值:

$$x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 0, x_4 = 0$$

由所对应的表 2.5 可知,这是一个正则解,又是可行解,因而这是一组最优解。

2.2　线性规划的对偶问题

自然界、人类社会和人的思维活动中,经常会出现对偶现象,因此为了研究这

些事物，也经常运用对偶理论来深入分析它们。例如安排生产与出售原料，转运与倒卖，工程任务的各工序的完成日期与工程进展的关键路线，最大赢得与最小损失，图的顶点与边线，武器装备的最小储备与最大生产能力的恢复，等等[1]。本节用几个例子说明这类问题的求解。

2.2.1 线性规划的对偶理论

当研究了各种形式的线性规划问题以后发现，其中有些线性规划之间是存在密切关系的。现在介绍一种所谓的"对偶"关系。

设有线性规划

$$\max f = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots + c_nx_n$$

满足

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n \leqslant b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n \leqslant b_2 \\ \cdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n \leqslant b_m \\ x_1 \geqslant 0, x_2 \geqslant 0, \cdots, x_n \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.27}$$

称为原规划。

设另有一个线性规划

$$\min g = b_1y_1 + b_2y_2 + \cdots + b_my_m$$

满足

$$\begin{cases} a_{11}y_1 + a_{21}y_2 + \cdots + a_{m1}y_m \geqslant c_1 \\ a_{12}y_1 + a_{22}y_2 + \cdots + a_{m2}y_m \geqslant c_2 \\ \cdots \\ a_{1n}y_1 + a_{2n}y_2 + \cdots + a_{mn}y_m \geqslant c_n \\ y_1 \geqslant 0, y_2 \geqslant 0, \cdots, y_m \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.28}$$

称为原规划的对偶规划。

原规划和对偶规划互为"对偶关系"。

原规划求极大，有 n 个变量，m 个约束不等式，不等号为"$\leqslant$"；对偶规划求极小，有 m 个变量，n 个约束不等式，不等号为"$\geqslant$"。

如果将它们写成矩阵形式，则为

原规划：

$$\max f = (c_1, c_2, \cdots, c_n)\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

满足
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \leqslant \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \geqslant \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

对偶规划：

$$\min g = (y_1, y_2, \cdots, y_m) \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$

满足
$$(y_1, y_2, \cdots, y_m) \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \geqslant (c_1, c_2, \cdots, c_n)$$

$$(y_1, y_2, \cdots, y_m) \geqslant (0, 0, \cdots, 0)$$

可进一步简记如下。

原规划：

$$\max f = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{x}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}x \leqslant b \\ x \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.29}$$

对偶规划：

$$\min g = \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} b$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A} \geqslant \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \\ y \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.30}$$

如果原规划形式为

$$\max f = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} x$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{A}x = b \\ x \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.31}$$

则其对偶规划形式为

$$\min g = \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} b$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{A} \geqslant \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}} \\ y \text{ 无符号限制} \end{cases} \tag{2.32}$$

对于形如式(2.31)的原规划问题，如果 $\boldsymbol{A}$ 中有一个 m 阶子式不为0，则可把该

m 阶子式作为系数行列式，将对应的 m 个变量解出来，也就是说将该 m 个变量写成其他 $n-m$ 个变量的表达式。设这个 m 阶子式对应的 m 阶矩阵为 $\boldsymbol{B}$，则 $\boldsymbol{A}$ 可以写成 $\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{B},\boldsymbol{N})$，而 x 对应地可以写成 $\begin{bmatrix} x_B \\ x_N \end{bmatrix}$，于是原规划的约束方程可以写为

$$(\boldsymbol{B},\boldsymbol{N})\begin{bmatrix} x_B \\ x_N \end{bmatrix} = b$$

即
$$\boldsymbol{B}x_B + \boldsymbol{N}x_N = b$$

即
$$\boldsymbol{B}x_B = b - \boldsymbol{N}x_N$$

即
$$x_B = \boldsymbol{B}^{-1}b - \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{N}x_N$$

代入目标函数，得

$$f = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}x = (c_B, c_N)\begin{bmatrix} x_B \\ x_N \end{bmatrix} = c_B x_B + c_N x_N =$$

$$c_B(\boldsymbol{B}^{-1}b - \boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{N}x_N) + c_N x_N =$$

$$c_B\boldsymbol{B}^{-1}b - (c_B\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{N} - c_N)x_N$$

称 x_B 为基变量，x_N 为非基变量，$(x_B, x_N)^{\mathrm{T}}$ 为基本解。

也就是说，目标函数可以写为

$$f = y_{00} - \sum_{j \in R_1} y_{0j}x_j$$

其中
$$y_{00} = c_B\boldsymbol{B}^{-1}b$$

$$y_{0j} = c_B\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{N}_j - c_j$$

给出变量 x 的一组取值 $x^0 = \begin{bmatrix} x_B^0 \\ x_N^0 \end{bmatrix}$，其中

$$x_B^0 = \boldsymbol{B}^{-1}b \quad x_N^0 = 0$$

当 $\boldsymbol{B}^{-1}b \geqslant 0$ 时，称 x^0 为原规划的可行解。

当对每个非基变量 x_j，都有 $y_{0j} = c_B\boldsymbol{B}^{-1}N_j - c_j \geqslant 0$ 时，称 x^0 为原规划的正则解。

如果 x^0 既是可行解，又是正则解，这时 x^0 就是原规划问题的最优解。

现在证明如下定理。

[定理 2.4] 如果原规划问题式(2.31)有最优解，则其对偶规划问题式(2.32)也有最优解。

证明：设原规划问题有最优解，并设基本可行解 x^0 是最优解，则有

$$\max f = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}x^0$$

$$\begin{cases} Ax^0 = b \\ x^0 \geq 0 \end{cases}$$

设 $x^0 = \begin{bmatrix} x_B^0 \\ x_N^0 \end{bmatrix}$，并设 $A = (B, N)$，$c^T = (c_B, c_N)$

则
$$(B, N)\begin{bmatrix} x_B^0 \\ x_N^0 \end{bmatrix} = Bx_B^0 + Nx_N^0 = b$$

于是
$$x_B^0 = B^{-1}b - B^{-1}Nx_N^0$$

从而有

$$f = c^T x^0 = (c_B, c_N)\begin{bmatrix} x_B^0 \\ x_N^0 \end{bmatrix} = c_B x_B^0 + c_N x_N^0 = c_B B^{-1} b - (c_B B^{-1} N - c_N) x_N^0 \tag{2.33}$$

且有
$$c_B B^{-1} N - c_N \geq 0 \tag{2.34}$$

令 $y^T = c_B B^{-1}$，下面证明 y 满足对偶规划的约束不等式，从而证明了对偶规划存在可行解，且目标函数值有界，也就证明了式(2.32)有最优解。

由 $y^T = c_B B^{-1}$ 右乘矩阵 A，得

$$y^T A = c_B B^{-1} A = c_B B^{-1}(B, N) = (c_B, c_B B^{-1} N)$$

由式(2.34)，有

$$y^T A = (c_B, c_B B^{-1} N) \geq (c_B, c_N) = c$$

即是说 $y^T = c_B B^{-1}$ 满足式(2.32)，对偶规划可行域非空。

现在证明对偶规划的目标函数值有界，任意取定对偶规划的一组可行解 $y^T = (y_1, y_2, \cdots, y_m)$。

则有
$$y^T A \geq c^T$$

设 x^0 是原规划的最优(基可行)解，对上式两端右乘 x^0，得

$$y^T A x^0 \geq c^T x^0 \tag{2.35}$$

由 x^0 是原规划的最优(基可行)解，则有

$$Ax^0 = b$$

两端左乘 y^T，得

$$y^T A x^0 = y^T b \tag{2.36}$$

由式(2.35)和式(2.36)可得

$$y^T b = y^T A x^0 \geq c^T x^0$$

由此得知对偶规划的目标函数值 $y^T b$ 取极小但有下界，从而对偶规划有最优解。

特别地，对于原规划的一个最优（基可行）解 $(x^0)^T = (x_B, x_N) = (B^{-1}b, 0)$，我们构造对偶规划的一个解 $y^T = c_B B^{-1}$，则此时对偶规划的目标函数值为

$$y^T b = c_B B^{-1} b = (c_B, c_N)\begin{bmatrix} B^{-1}b \\ 0 \end{bmatrix} = c^T x^0$$

即原规划与对偶规划同时达到最优解，且最优目标函数值相同，从而有下面定理。

[定理 2.5] 如原规划有最优解，则对偶规划也有最优解，并且原规划与对偶规划的最优目标函数值相同；如原规划问题无界，则对偶规划问题无界或无可行解；如原规划无可行解，则对偶规划无可行解或问题无界。

由定理 2.5 求解线性规划问题，可有三种形式：①求解原规划；②求解对偶规划；③求解由原规划与对偶规划中的所有不等式所组成的不等式组，并满足原规划与对偶规划目标函数值相等。

下面介绍线性规划对偶理论中最重要的定理，被称为互补松紧定理。

[定理 2.6] 设 x 是原规划（L）的可行解，y 是对偶规划（P）的可行解，则它们分别是原规划、对偶规划最优解的充分必要条件是，对所有的 $i=1,2,\cdots,m$ 和所有的 $j=1,2,\cdots,n$ 有

$$y_i(a_i x - b_i) = 0 \tag{2.37}$$

$$(c_j - y^T A_j)x_j = 0 \tag{2.38}$$

其中

$$a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{in}), A_j = \begin{bmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \vdots \\ a_{mj} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_j \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, y^T = (y_1, y_2, \cdots, y_i, \cdots, y_m)$$

证明：首先由 x 是原规划的可行解，y 是对偶规划的可行解，知

$$a_i x \leqslant b_i$$

$$c_j \leqslant y^T A_j$$

且 $x_j \geqslant 0, y_i \geqslant 0$，有

$$y_i(a_i x - b_i) \leqslant 0$$

$$(c_j - y^T A_j)x_j \leqslant 0$$

令

$$\begin{cases} u_i = y_i(a_i x - b_i) \\ v_j = (c_j - y^T A_j)x_j \end{cases} \tag{2.39}$$

令
$$\begin{cases} u = \sum_{i=1}^{m} u_i, \text{则有 } u \leqslant 0 \\ v = \sum_{j=1}^{n} v_j, \text{则有 } v \leqslant 0 \end{cases}$$

有

$$0 \geqslant u + v = \sum_{i=1}^{m} y_i(\boldsymbol{a}_i x - b_i) + \sum_{j=1}^{n} (c_j - \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_j)x_j =$$
$$\sum_{i=1}^{m} y_i(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j - b_i) + \sum_{j=1}^{n} (c_j - \sum_{i=1}^{m} y_i a_{ij})x_j =$$
$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j y_i - \sum_{i=1}^{m} y_i b_i + \sum_{j=1}^{n} c_j x_j - \sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{m} a_{ij}x_j y_i =$$
$$\sum_{j=1}^{n} c_j x_j - \sum_{i=1}^{m} b_i y_i = cx - \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}} b \tag{2.40}$$

可见,式(2.37)和式(2.38)成立的充分必要条件是式(2.40)成立。

根据互补松紧条件,有时,在求解一个具体的线性规划问题时,并不是单一的求解原规划或对偶规划,而是同时求解原规划与对偶规划。如果已知 x 是原规划的可行解,y 是对偶规划的可行解;并且如果某个 $x_j > 0$,则 x_j 对应的对偶规划的约束不等式取等号,即 $c_j - \boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}_j = 0$;如果某个约束不等式取严格不等式, $\boldsymbol{a}_i \boldsymbol{x} - b_i > 0$,则该约束不等式所对应的对偶规划中的对偶变量取值为0,即 $y_i = 0$ 。则可以断定,x,y 分别是原规划与对偶规划的最优解。

2.2.2 原材料与产品的对偶

[例 2.2] 某企业现有一根长 10m 的棒材,6 桶涂料,5 张胶合板,计划生产甲、乙两种保障装备产品,已知甲种产品每件消耗棒材 2m,消耗涂料 2 桶,不消耗胶合板,可赢利 3 千元;乙种产品每件消耗棒材 3m,消耗涂料 1 桶,消耗胶合板 2 张,可赢利 2 千元,问如何安排生产,使总赢利最大?

解:根据上述问题给出表 2.6。

表 2.6

产品 / 原料	甲种产品每件	乙种产品每件	总 计
棒材 y_1	2	3	10(m)
涂料 y_2	2	1	6(桶)
胶合板 y_3	0	2	5(张)
盈利 / 千元	3	2	

设安排生产 x_1 件甲种产品，x_2 件乙种产品，则有如下线性规划，称为原规划。

$$\max f = 3x_1 + 2x_2$$

满足
$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 \leqslant 10 \\ 2x_1 + x_2 \leqslant 6 \\ 0x_1 + 2x_2 \leqslant 5 \\ x_1, x_2 \geqslant 0 \end{cases}$$

采用“定界对偶算法”求解。

由约束不等式，可得 $x_1 \leqslant 3, x_2 \leqslant 3$ 。增加松弛变量，化为约束等式：

$$\max f = 3x_1 + 2x_2$$

满足
$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + x_3 = 10 \\ 2x_1 + x_2 + x_4 = 6 \\ 2x_2 + x_5 = 5 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.41}$$

$$\begin{cases} f = 3x_1 + 2x_2 \\ x_3 = 10 - 2x_1 - 3x_2 \\ x_4 = 6 - 2x_1 - x_2 \\ x_5 = 5 - 2x_2 \end{cases} \tag{2.42}$$

填入表 2.7 中。

表 2.7

	常数	(3) x_1	(3) x_2	取值
$f =$	0	$+3x_1$	$+2x_2$	15
$x_3 =$	10	$-2x_1$	$-3x_2$	-5
$x_4 =$	6	$-2x_1$	$-x_2$	-3
$x_5 =$	5		$-2x_2$	-1

检查，基变量 x_3 的取值不满足非负要求，让 x_3 出基，进基变量的选取由下式确定：

$$\max\left\{\frac{+3}{-2}, \frac{-2}{+3}\right\} = \frac{-2}{+3}$$

让 x_2 进基。由式(2.42) 中的 $x_3 = 10 - 2x_1 - 3x_2$ 解出 x_2 ，代入其他各式，得

$$
\begin{cases}
f = \dfrac{20}{3} + \dfrac{5}{3}x_1 - \dfrac{2}{3}x_3 \\
x_2 = \dfrac{10}{3} - \dfrac{2}{3}x_1 - \dfrac{1}{3}x_3 \\
x_4 = \dfrac{8}{3} - \dfrac{4}{3}x_1 + \dfrac{1}{3}x_3 \\
x_5 = -\dfrac{5}{3} + \dfrac{4}{3}x_1 + \dfrac{2}{3}x_3
\end{cases}
\tag{2.43}
$$

填入表2.8中。

表2.8

	常数项	(3) x_1	x_3 (0)	取值
$f =$	$\frac{20}{3}$	$+\frac{5}{3}x_1$	$-\frac{2}{3}x_3$	$\frac{35}{3}$
$x_2 =$	$\frac{10}{3}$	$-\frac{2}{3}x_1$	$-\frac{1}{3}x_3$	$\frac{4}{3}$
$x_4 =$	$\frac{8}{3}$	$-\frac{4}{3}x_1$	$+\frac{1}{3}x_3$	$-\frac{4}{3}$
$x_5 =$	$-\frac{5}{3}$	$+\frac{4}{3}x_1$	$+\frac{2}{3}x_3$	$+\frac{7}{3}$

检查最后一列,基变量的取值是否满足非负要求和上下界限制。x_4 的取值不满足非负要求,令 x_4 出基,出基后变成取下界值0的非基变量。进基变量的选取由下式确定:

$$
\max\left\{\frac{\frac{5}{3}}{-\frac{4}{3}}, \frac{-\frac{2}{3}}{+\frac{1}{3}}\right\} = \left\{-\frac{5}{4}\right\} = -\frac{5}{4}
$$

确定为 x_1 的进基变量。由式(2.43)的 $x_4 = \frac{8}{3} - \frac{4}{3}x_1 + \frac{1}{3}x_3$,解出 x_1,代入其他各式,得

$$
f = 10 - \frac{5}{4}x_4 - \frac{1}{4}x_3
$$

$$
x_2 = 2 + \frac{1}{2}x_4 - \frac{1}{2}x_3
$$

$$x_1 = 2 - \frac{3}{4}x_4 + \frac{1}{4}x_3$$

$$x_5 = 1 - x_4 + x_3$$

填入表2.9中。

表2.9

	常数项	x_4 (0)	x_3 (0)	取值
$f=$	10	$-\frac{5}{4}x_4$	$-\frac{1}{4}x_3$	10
$x_2=$	2	$+\frac{1}{2}x_4$	$-\frac{1}{2}x_3$	2
$x_1=$	2	$-\frac{3}{4}x_4$	$+\frac{1}{4}x_3$	2
$x_5=$	1	$-x_4$	$+x_3$	1

检查,得到可行解 $x_1 = 2, x_2 = 2, x_3 = 0, x_4 = 0, x_5 = 1, f^* = 10$。

现在,换另外一种思路考虑问题,不是通过安排生产,而是直接出售原材料获利。设每米棒材定价 y_1(千元),每桶涂料定价 y_2(千元),每张胶合板定价 y_3(千元),很自然的要求,生产每件产品的原材料总价不应低于这件产品的赢利,在这一前提要求下,在市场上的总报价最低才能在市场上有竞争力。于是有

$$\min g = 10y_1 + 6y_2 + 5y_3$$

$$\begin{cases} 2y_1 + 2y_2 + 0y_3 \geqslant 3 \\ 3y_1 + y_2 + 2y_3 \geqslant 2 \\ y_1, y_2, y_3 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.44}$$

式(2.44)所对应的线性规划,称为对偶规划。仍然采用定界对偶算法,求解对偶规划式(2.44)首先化为标准形式:

$$\max h = -10y_1 - 6y_2 - 5y_3$$

$$\begin{cases} -2y_1 - 2y_2 \leqslant -3 \\ -3y_1 - y_2 - 2y_3 \leqslant -2 \\ y_1, y_2, y_3 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.45}$$

增加松弛变量,化为等式:

$$\max h = -10y_1 - 6y_2 - 5y_3$$

$$\begin{cases} -2y_1 - 2y_2 + y_4 = -3 \\ -3y_1 - y_2 - 2y_3 + y_5 = -2 \\ y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.46}$$

有

$$\begin{cases} h = -10y_1 - 6y_2 - 5y_3 \\ y_4 = -3 + 2y_1 + 2y_2 \\ y_5 = -2 + 3y_1 + y_2 + 2y_3 \end{cases} \tag{2.47}$$

填入表 2.10 中。

表 2.10

	常数项	y_1 (0)	y_2 (0)	y_3 (0)	取值
h =	0	$-10y_1$	$-6y_2$	$-5y_3$	0
y_4 =	-3	$+2y_1$	$+2y_2$		-3
y_5 =	-2	$+3y_1$	$+y_2$	$+2y_3$	-2

检查,基变量 y_4 的取值不满足非负要求,让 y_4 出基,进基变量的选取由下式确定:

$\max\left\{\dfrac{-10}{+2}, \dfrac{-6}{+2}\right\}$,让 y_2 进基,由式(2.47)中 y_4 解出 y_2,代入其他各式,有

$$\begin{cases} h = -9 - 4y_1 - 3y_4 - 5y_3 \\ y_2 = \dfrac{3}{2} - y_1 + \dfrac{1}{2}y_4 \\ y_5 = -\dfrac{1}{2} + 2y_1 + 2y_3 + \dfrac{1}{2}y_4 \end{cases} \tag{2.48}$$

填入表 2.11 中。

表 2.11

	常数项	y_1 (0)	y_4 (0)	y_3 (0)	取值
h =	-9	$-4y_1$	$-3y_4$	$-5y_3$	-9
y_2 =	$\dfrac{3}{2}$	$-y_1$	$+\dfrac{1}{2}y_4$		$\dfrac{3}{2}$
y_5 =	$-\dfrac{1}{2}$	$+2y_1$	$+\dfrac{1}{2}y_4$	$+2y_3$	$-\dfrac{1}{2}$

检查,基变量 y_5 的取值不满足非负要求,让 y_5 出基,进基变量的选取由下式确定:

$\max\left\{\dfrac{-4}{+2}, \dfrac{-3}{+\frac{1}{2}}, \dfrac{-5}{+2}\right\} = \dfrac{-4}{+2}$,让 y_1 进基,由 y_5 表达式解出 y_1,代入其他各式,有

$$
\begin{cases}
h = -10 - y_3 - 2y_4 - 2y_5 \\
y_2 = \dfrac{5}{4} + y_3 + \dfrac{3}{4}y_4 - \dfrac{1}{2}y_5 \\
y_1 = \dfrac{1}{4} - y_3 - \dfrac{1}{4}y_4 + \dfrac{1}{2}y_5
\end{cases}
\tag{2.49}
$$

填入表 2.12 中。

检查,基变量的取值满足非负条件,得到可行解,于是得到一组原材料的定价:

$$y_1 = \frac{1}{4}, y_2 = \frac{5}{4}, y_3 = 0, g^* = 10$$

表 2.12

	常数项	y_3 (0)	y_4 (0)	y_5 (0)	取值
$h =$	-10	$-y_3$	$-2y_4$	$-2y_5$	-10
$y_1 =$	$\frac{1}{4}$	$-y_3$	$-\frac{1}{4}y_4$	$+\frac{1}{2}y_5$	$\frac{1}{4}$
$y_2 =$	$\frac{5}{4}$	$+y_{31}$	$+\frac{3}{4}y_4$	$-\frac{1}{2}y_5$	$\frac{5}{4}$

在对偶规划的最优解表格中,变量的取值的经济学意义就是在安排生产时,原材料的影子价格,即每米棒材、每桶涂料、每张胶合板的影子价格。如果在市场上原材料的价格比较贵,高于原材料的影子价格,企业就有必要考虑是安排生产还是出售原材料。

2.2.3 运输与贩卖的对偶

[例 2.3] 现有两个产地 A_1, A_2 分别供应 8t,7t 的物资,计划运到三个销地 B_1, B_2, B_3,各销地的需求已知,从 A_1, A_2 分别到 B_1, B_2, B_3 的单位物资的运价已知,见表 2.13;试给出一个运输方案,使总运费最省。

表 2.13 运输表

产地 \ 单位运价 \ 销地	B_1	B_2	B_3	供应量 /t
A_1	9	7	3	8
A_2	4	8	6	7
需求量/t	6	4	5	

解:设从产地 A_1, A_2 运到 B_1, B_2, B_3 分别运送 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 吨的物资,则有

如下线性规划，称为原方程。

目标函数为

$$\min g = 9x_1 + 7x_2 + 3x_3 + 4x_4 + 8x_5 + 6x_6$$

约束方程为

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 8 \\ x_4 + x_5 + x_6 = 7 \\ x_1 + x_4 = 6 \\ x_2 + x_5 = 4 \\ x_3 + x_6 = 5 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.50}$$

由约束等式组，可得

$x_1 \leqslant 6, x_2 \leqslant 4, x_3 \leqslant 5, x_4 \leqslant 6, x_5 \leqslant 4, x_6 \leqslant 5$ 。这是一个具有 $m = 2$ 个产地、$n = 3$ 个销地的供销平衡的运输问题，考查其约束方程组，由于系统矩阵与增广矩阵的秩相等都是 $m + n - 1 = 4$ ，因此可任选其中的4个方程，如取前4个方程，求解得

$$\begin{cases} x_3 = 8 - x_1 - x_2 \\ x_4 = 6 - x_1 \\ x_5 = 4 - x_2 \\ x_6 = -3 + x_1 + x_2 \end{cases} \tag{2.51}$$

将目标函数改为 $\max h = -9x_1 - 7x_2 - 3x_3 - 4x_4 - 8x_5 - 6x_6$ ，这时 h 的表达式为 $h = -62 - 8x_1 - 2x_2$ ，填入表2.14中。

表2.14

	常数项	x_1 (0)	x_2 (0)	取值
$h =$	-62	$-8x_1$	$-2x_2$	-62
$x_3 =$	8	$-x_1$	$-x_2$	8
$x_4 =$	6	$-x_1$		6
$x_5 =$	4		$-x_2$	4
$x_6 =$	-3	$+x_1$	$+x_2$	-3

检查，基变量 x_6 的取值不满足非负要求，让其出基，进基变量的选取由下式确定：

$$\max\left\{\frac{-8}{+1},\frac{-2}{+1}\right\}=\frac{-2}{+1}$$

让 x_2 进基。由式(2.51)中 x_6 的表达式解出 x_2，并代入其他各式，得到

$$\begin{cases} h = -68 - 6x_1 - 2x_6 \\ x_3 = 5 - x_6 \\ x_4 = 6 - x_1 \\ x_5 = 1 + x_1 - x_6 \\ x_2 = 3 - x_1 + x_6 \end{cases} \tag{2.52}$$

填入表 2.15 中。

表 2.15

	常数项	x_1 (0)	x_6 (0)	取值
h =	-68	$-6x_1$	$-2x_6$	-68
x_3 =	5		$-x_6$	5
x_4 =	6	$-x_1$		6
x_5 =	1	$+x_1$	$-x_6$	1
x_2 =	-3	$+x_1$	$+x_6$	3

检查各基变量的取值，满足上下界要求，得到最优方案对应的运输表，即表 2.16。

表 2.16

	B_1	B_2	B_3	
A_1	0 [9]	③ [7]	⑤ [3]	8
A_2	⑥ [4]	② [8]	0 [6]	7
	6	4	5	

现在，换另外一种思路考虑问题，不是考虑转运中的最小费用，而是考虑将物资从产地转运到销地，通过倒卖赚取差价。设 A_1，A_2 的单位购价分别是 y_1（元）、y_2（元），而且在 B_1，B_2，B_3 的单位售价分别为 δ_1（元）、δ_2（元）、δ_3（元）；转运商的目标是从中获取的总差价最大。假定倒卖商有权控制产地销地的单价，其目标就

是 $\max f = 6\delta_1 + 4\delta_2 + 5\delta_3 - 8y_1 - 7y_2$。但是确定产地、销地的单价，不能随心所欲，应当遵守市场规则，任何一个销地和产地之间的单价差，不应高于这两者之间的单位运费，既有如下目标函数和约束不等式：

$$\max f = 6\delta_1 + 4\delta_2 + 5\delta_3 - 8y_1 - 7y_2$$

$$\begin{cases} \delta_1 \quad\quad\quad - y_1 \quad\quad \leqslant 9 \\ \quad \delta_2 \quad\quad - y_1 \quad\quad \leqslant 7 \\ \quad\quad \delta_3 - y_1 \quad\quad \leqslant 3 \\ \delta_1 \quad\quad\quad\quad - y_2 \leqslant 4 \\ \quad \delta_2 \quad\quad\quad - y_2 \leqslant 8 \\ \quad\quad \delta_3 \quad\quad - y_2 \leqslant 6 \\ \delta_1, \ \delta_2, \ \delta_3, \ y_1, \ y_2, \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.53}$$

增加松弛变量，化为标准形式如下：

$$\max f = 6\delta_1 + 4\delta_2 + 5\delta_3 - 8y_1 - 7y_2$$

$$\begin{cases} \delta_1 \quad\quad\quad - y_1 \quad\quad + u_1 \leqslant 9 \\ \quad \delta_2 \quad\quad - y_1 \quad\quad + u_2 \leqslant 7 \\ \quad\quad \delta_3 - y_1 \quad\quad + u_3 \leqslant 3 \\ \delta_1 \quad\quad\quad\quad - y_2 + u_4 \leqslant 4 \\ \quad \delta_2 \quad\quad\quad - y_2 + u_5 \leqslant 8 \\ \quad\quad \delta_3 \quad\quad - y_2 + u_6 \leqslant 6 \\ \delta_1, \delta_2, \ \delta_3, \ y_1, y_2, \ u_1, u_2, \ u_3, u_4, \ u_5, u_6 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.54}$$

不妨设 $y_1 \leqslant m, y_2 \leqslant n, m > n > 0$，于是

$$u_1 \leqslant 9 + m, u_2 \leqslant 7 + m, u_3 \leqslant 3 + m$$

$$u_1 \leqslant 4 + n, u_2 \leqslant 8 + n, u_3 \leqslant 6 + n$$

即有

$$u_1 \leqslant 9 + m, u_2 \leqslant 8 + m, u_3 \leqslant 6 + m$$

$$\begin{cases} f = 0 + 6\delta_1 + 4\delta_2 + \delta_3 - 8y_1 - 7y_2 \\ u_1 = 9 - \delta_1 + y_1 \\ u_2 = 7 - \delta_2 + y_1 \\ u_3 = 3 - \delta_3 + y_1 \\ u_4 = 4 - \delta_1 + y_2 \\ u_5 = 8 - \delta_2 + y_2 \\ u_6 = 6 - \delta_3 + y_2 \end{cases} \tag{2.55}$$

填入表 2.17 中。

表 2.17

	常数项	(9+m) $\dot{\delta}_1$	(8+m) $\dot{\delta}_2$	(6+m) $\dot{\delta}_3$	$\dot{y}_1$ (0)	$\dot{y}_2$ (0)	取 值
$f =$	0	$+6\delta_1$	$+4\delta_2$	$+5\delta_3$	$-8y_1$	$-7y_2$	$116+15m$
$u_1 =$	9	$-\delta_1$			$+y_1$		$-m$
$u_2 =$	7		$-\delta_2$		$+y_1$		$-1-m$
$u_3 =$	3			$-\delta_3$	$+y_1$		$-3-m$
$u_4 =$	4	$-\delta_1$				$+y_2$	$-5-m$
$u_5 =$	8		$-\delta_2$			$+y_2$	$-m$
$u_6 =$	6			$-\delta_3$		$+y_2$	$-m$

检查,基变量 u_4 不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取由下式确定:

$$\max\left\{\frac{+6}{-1},\frac{-7}{+1}\right\}=\frac{+6}{-1}$$

让 δ_1 进基,由式(2.55),解出 δ_1 ,并代入其他各式,迭代后得到表 2.18。

表 2.18

	常数项	$\dot{u}_4$ (0)	(8+m) $\dot{\delta}_2$	(6+m) $\dot{\delta}_3$	$\dot{y}_1$ (0)	$\dot{y}_2$ (0)	取 值
$f =$	24	$-6u_4$	$+4\delta_2$	$+5\delta_3$	$-8y_1$	$-y_2$	$86+9m$
$u_1 =$	5	$+u_4$			$+y_1$	$-y_2$	5
$u_2 =$	7		$-\delta_2$		$+y_1$		$-1-m$
$u_3 =$	3			$-\delta_3$	$+y_1$		$-3-m$
$\delta_1 =$	4	$-u_4$				$+y_2$	4
$u_5 =$	8		$-\delta_2$			$+y_2$	$-m$
$u_6 =$	6			$-\delta_3$		$+y_2$	$-m$

检查,基变量 u_3 的取值不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取由下式确定: $\max\left\{\frac{+5}{-1},\frac{-8}{+1}\right\}=\frac{+5}{-1}$,让 δ_3 进基,由表 2.18,迭代后得到表 2.19。

表 2.19

	常数项	$\dot{u}_4$ (0)	(8+m) $\dot{\delta}_2$	$\dot{u}_3$ (0)	$\dot{y}_1$ (0)	$\dot{y}_2$ (0)	取 值
$f =$	39	$-6u_4$	$+4\delta_2$	$-5k_3$	$-3y_1$	$-y_2$	$71+4m$
$u_1 =$	5	$+u_4$			$+y_1$	$-y_2$	5
$u_2 =$	7		$-\delta_2$		$+y_1$		$-1-m$
$\delta_3 =$	3			$-k_3$	$+y_1$		3

（续）

	常数项	u_4 (0)	(8+m) δ_2	u_3 (0)	y_1 (0)	y_2 (0)	取 值
δ_1 =	4	$-u_4$				$+y_2$	4
u_5 =	8		$-\delta_2$			$+y_2$	$-m$
u_6 =	3			$+k_3$		$+y_2$	3

检查，基变量 u_2 的取值不满足非负要求，让其出基，进基变量的选取由下式确定：$\max\left\{\frac{+4}{-1},\frac{-3}{+1}\right\}=\frac{-3}{+1}$，让 y_1 进基，由表 2.19，迭代后得到表 2.20。

表 2.20

	常数项	u_4 (0)	(8+m) δ_2	u_3 (0)	u_2 (0)	y_2 (0)	取 值
f =	60	$-6u_4$	$+\delta_2$	$-5k_3$	$-3u_2$	$-y_2$	$68+4m$
u_1 =	−2	$+u_4$	$+\delta_2$		$+u_2$	$-y_2$	$6+m$
y_1 =	−7		$+\delta_2$		$+u_2$		$1+m$
δ_3 =	−4		$+\delta_2$	$-k_3$	$+u_2$		$4+m$
δ_1 =	4	$-u_4$				$+y_2$	4
u_5 =	8		$-\delta_2$			$+y_2$	$-m$
u_6 =	10		$-\delta_2$	$+k_3$	$-u_2$	$+y_2$	$2-m$

由 $m>0$，这时基变量 u_5 的取值不满足非负要求，让其出基，进基变量选取由下式确定：$\max\left\{\frac{+1}{-1},\frac{-1}{+1}\right\}=\frac{+1}{-1}$，让 δ_2 进基，由表 2.20，迭代后得到表 2.21。

表 2.21

	常数项	u_4 (0)	u_5 (0)	u_3 (0)	u_2 (0)	y_2 (0)	取值
f =	68	$-6u_4$	$-k_5$	$-5k_3$	$-3u_2$	$0y_2$	68
u_1 =	6	$+u_4$	$-k_5$		$+u_2$		6
y_1 =	1		$-k_5$		$+u_2$	$+y_2$	1
δ_3 =	4		$-k_5$			$+y_2$	4
δ_1 =	4	$-u_4$				$+y_2$	4
δ_2 =	8		$-k_5$			$+y_2$	8
u_6 =	2		$+k_5$	$+k_3$	$-u_2$		2

检查基变量的取值，都符合上下界要求，从而得到了一个基本正则可行解。将产地、销地的单价填入表 2.22。

表 2.22 中，给出了各产地、各销地的单价。各产地、各销地的单价不是独立

的，其中有一个是自由的。

在解题过程中，使用了“虚拟上界”的概念，给出了处理方法。

表 2.22

		$\delta_1=4$	$\delta_2=8$	$\delta_2=4$	
		B_1	B_2	B_3	
$y_1=1$	A_1	9	7	3	8
$y_2=0$	A_2	4	8	6	7
		6	4	5	

2.2.4 关键路径与里程碑节点的对偶

[例 2.4] 一项装备保障工程，可以分解为 6 道工序，工序明细表见表 2.23，求这项工程的总工期。

根据工序明细表，画出计划网络图，如图 2.2 所示。

表 2.23 工序明细表

工序名称	紧前工序	该工序所需时间/天
A		18
B	A	15
C		10
D		5
E	B,C	7
F	A	12

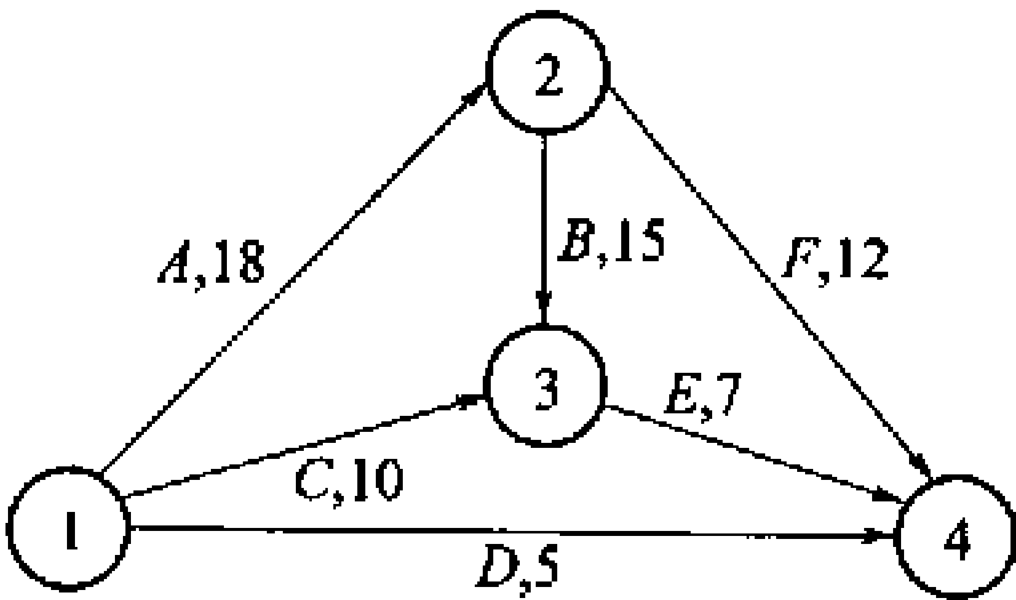


图 2.2 6 道工序关系图

对每个节点定义一个决策变量，依次是 x_1,x_2,x_3,x_4；对每个工序对应一个始点，一个终点；某个节点对应的决策变量表示以该节点为终点的所有工序都完成的日期。即有以下线性规划模型，称为原规划。

$$\min g = x_4 - x_1$$

$$\begin{cases} -x_1 + x_2 \geqslant 18 \\ -x_2 + x_3 \geqslant 15 \\ -x_1 + x_3 \geqslant 10 \\ -x_1 + x_4 \geqslant 5 \\ -x_2 + x_4 \geqslant 12 \\ -x_3 + x_4 \geqslant 7 \\ x_1,x_2,x_3,x_4 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.56}$$

即

$$\min g = -x_1 + 0x_2 + 0x_3 + x_4$$

$$\begin{cases} -x_1 + x_2 \geqslant 18 \\ -x_2 + x_3 \geqslant 15 \\ -x_1 + x_3 \geqslant 10 \\ -x_1 + x_4 \geqslant 5 \\ -x_2 + x_4 \geqslant 12 \\ -x_3 + x_4 \geqslant 7 \\ x_1, x_2, x_3, x_4 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.57}$$

解这个线性规划问题，化为标准形式。

$$\max h = x_1 + 0x_2 + 0x_3 - x_4$$

$$\begin{cases} x_1 - x_2 \leqslant -18 \\ x_2 - x_3 \leqslant -15 \\ x_1 - x_3 \leqslant -10 \\ x_1 - x_4 \leqslant -5 \\ x_2 - x_4 \leqslant -12 \\ x_3 - x_4 \leqslant -7 \\ x_1, x_2, x_3, x_4 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.58}$$

不妨设 $x_1 = 0$，而 $x_2, x_3, x_4 \geqslant 0$，由于各工序所需时间的总和为67，所以可以认为 $x_2 \leqslant 67, x_3 \leqslant 67, x_4 \leqslant 67$。

从而有

$$\max h = 0 + 0x_2 + 0x_3 - x_4$$

$$\begin{cases} -x_2 + x_5 = -18 \\ x_2 - x_3 + x_6 = -15 \\ -x_3 + x_7 = -10 \\ -x_4 + x_8 = -5 \\ x_2 - x_4 + x_9 = -12 \\ x_3 - x_4 + x_{10} = -7 \\ x_2 \leqslant 67, x_3 \leqslant 67, x_4 \leqslant 67 \\ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \cdots, x_{10} \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.59}$$

即有

$$
\begin{cases}
h = 0 + 0x_2 + 0x_3 - x_4 \\
x_5 = -18 + x_2 \\
x_6 = -15 - x_2 + x_3 \\
x_7 = -10 + x_3 \\
x_8 = -5 + x_4 \\
x_9 = -12 - x_2 + x_4 \\
x_{10} = -7 - x_3 + x_4
\end{cases}
\tag{2.60}
$$

填入表 2.24 中。

表 2.24

	常数项	(67) x_2	(67) x_3	x_4 (0)	取值
h =	0	$+0x_2$	$+0x_3$	$-x_4$	0
x_5 =	−18	$+x_2$			49
x_6 =	−15	$-x_2$	$+x_3$		−15
x_7 =	−10		$+x_3$		57
x_8 =	−5			$+x_4$	−5
x_9 =	−12	$-x_2$		$+x_4$	−79
x_{10} =	−7		$-x_3$	$+x_4$	−74

检查,基变量 x_9 的取值不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取由下式确定:$\max\left\{\frac{+0}{-1},\frac{-1}{+1}\right\}=\frac{+0}{-1}$,让 x_2 进基,迭代后得到表 2.25。

表 2.25

	常数项	x_9 (0)	(67) x_3	x_4 (0)	取值
h =	0	$-0x_9$	$+0x_3$	$-x_4$	0
x_5 =	−30	$-x_9$		$+x_4$	−30
x_6 =	−3	$+x_9$	$+x_3$	$-x_4$	64
x_7 =	−10		$+x_3$		57
x_8 =	−5			$+x_4$	−5
x_2 =	−12	$-x_9$		$+x_4$	−12
x_{10} =	−7		$-x_3$	$+x_4$	−74

检查,基变量 x_{10}的取值不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取由下式确定:$\max\left\{\frac{+0}{-1},\frac{-1}{+1}\right\}=\frac{+0}{-1}$,让 x_3 进基,迭代后得到表 2.26。

表 2.26

	常数项	$\underset{(0)}{x_9}$	$\underset{(0)}{x_{10}}$	$\underset{(0)}{x_4}$	取值
$h=$	0	$-0x_9$	$-0x_{10}$	$-x_4$	0
$x_5=$	-30	$-x_9$		$+x_4$	-30
$x_6=$	-10	$+x_9$	$-x_{10}$		-10
$x_7=$	-17		$-x_{10}$	$+x_4$	-17
$x_8=$	-5			$+x_4$	-5
$x_2=$	-12	$-x_9$		$+x_4$	-12
$x_3=$	-7		$-x_{10}$	$+x_4$	-7

检查,基变量 x_5 的取值不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取由下式确定:$\max\left\{\frac{-1}{+1}\right\}$,$x_4$ 进基,迭代后得到表 2.27。

表 2.27

	常数项	$\underset{(0)}{x_9}$	$\underset{(0)}{x_{10}}$	$\underset{(0)}{x_5}$	取值
$h=$	-30	$-x_9$	$-0x_{10}$	$-x_5$	-30
$x_4=$	30	$+x_9$		$+x_5$	30
$x_6=$	-10	$+x_9$	$-x_{10}$		-10
$x_7=$	13	$+x_9$	$-x_{10}$	$+x_5$	13
$x_8=$	25	$+x_9$		$+x_5$	25
$x_2=$	18			$+x_5$	18
$x_3=$	23	$+x_9$	$-x_{10}$	$+x_5$	23

检查,基变量 x_6 的取值不满足非负要求,让 x_6 出基,进基变量的选取由下式确定:$\max\left\{\frac{-1}{+1}\right\}$,$x_9$ 进基,迭代后得到表 2.28。

表 2.28

	常数项	$\dot{x}_6$ (0)	$\dot{x}_{10}$ (0)	$\dot{x}_5$ (0)	取值
$h=$	-40	$-x_6$	$-0x_{10}$	$-x_5$	-40
$x_4=$	40	$+x_6$	$+x_{10}$	$+x_5$	40
$x_6=$	10	$+x_6$	$+x_{10}$		10
$x_7=$	23	$+x_6$		$+x_5$	23
$x_8=$	35	$+x_6$	$+x_{10}$	$+x_5$	35
$x_2=$	18			$+x_5$	18
$x_3=$	33	$+x_6$		$+x_5$	33

得 $x_1=0, x_2=18, x_3=33, x_4=40, g=40$，即该工程在零时开工，在 40 天后完工。在组织大型的工程任务时，通过求解上述的原规划，得到了每个节点对应的变量的取值，将每个节点对应的变量的取值，称为该工程任务的里程碑。

现在换另一种思路考虑问题，对每条弧定义一个决策变量，依次为 $y_A, y_B, y_C, y_D, y_E, y_F$；每一条从工程总起点到工程总终点的有向路都是一个可行解，目标是寻找一条最长的路线，即关键路线。于是有

$$\max f = 18y_A + 15y_B + 10y_C + 5y_D + 7y_E + 12y_F$$

$$\begin{cases} y_A + y_C + y_D = 1 \\ y_A - y_B - y_F = 0 \\ y_B + y_C - y_E = 0 \\ y_D + y_E + y_F = 1 \\ y_A,\ y_B,\ y_C,\ y_D,\ y_E,\ y_F,\ \geqslant 0, \text{整数} \\ y_A,\ y_B,\ y_C,\ y_D,\ y_E,\ y_F,\ \leqslant 1 \end{cases} \tag{2.61}$$

于是有

$$\begin{cases} f = 5 + 25y_A + 25y_A + 25y_A \\ y_D = 1 - y_A - y_C \\ y_E = y_B + y_C \\ y_F = y_A - y_B \end{cases}$$

填入表 2.29 中。

表 2.29

	常数项	$\overset{(1)}{\dot{y}_A}$	$\overset{(1)}{\dot{y}_B}$	$\overset{(1)}{\dot{y}_C}$	取值
$f=$	5	$+25y_A$	$+10y_B$	$+12y_C$	52
$y_D=$	1	$-y_A$		$-y_C$	-1
$y_E=$	0		$+y_B$	$+y_C$	2
$y_F=$	0	$+y_A$	$-y_B$		0

检查,基变量 y_D 的取值不满足非负要求,让其出基,进基变量的选取下式确定:

$\max\left\{\frac{+25}{-1},\frac{+12}{-1}\right\}=\frac{+12}{-1}$,让 y_C 进基,迭代后得到表 2.30。

表 2.30

	常数项	$\overset{(1)}{\dot{y}_A}$	$\overset{(1)}{\dot{y}_B}$	$\underset{(0)}{\dot{y}_D}$	取值
$f=$	17	$+13y_A$	$+10y_B$	$-y_D$	40
$y_C=$	1	$-y_A$		$-y_D$	0
$y_E=$	1	$-y_A$	$+y_B$	$-y_D$	1
$y_F=$	0	$+y_A$	$-y_B$		0

检查,得到可行解:

$$y_A=y_B=y_E=1,y_C=y_D=y_F=0$$

这是一条关键路线,如图 2.3 所示。

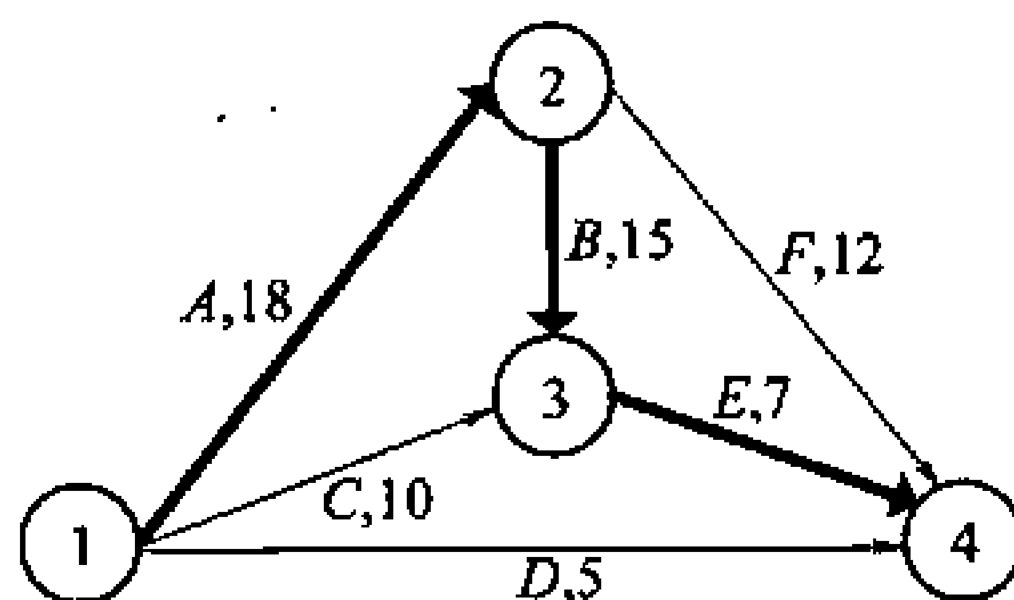


图 2.3 关键路线

一项工程任务,既可以采用时间里程碑的管理办法,也可以采用抓住关键路线的管理办法。

2.2.5 二人零和博弈局中人的对偶

[例 2.5] 甲乙二人零和博弈,局中人甲的赢得矩阵见表 2.31,试求甲的最优策略。

解:该博弈没有纯策略条件下的平衡解。

现在求甲的最优混合策略。为了叙述方便，将甲的赢得用字母表示，见表2.32。

表 2.31　甲的赢得矩阵

甲＼乙 甲赢得	B_1	B_2	B_3
A_1	1	6	3
A_2	5	2	4

表 2.32　甲的赢得矩阵

	B_1	B_2	B_3
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}

假设甲分别以概率 x_1, x_2 选取纯策略 A_1, A_2；乙分别以概率 y_1, y_2, y_3 选取纯策略 B_1, B_2, B_3；而这时甲的赢得值(即乙的损失值)为 v。

现在给出甲乙在混合策略意义下的最优解的定义：如果存在两组 $\{x_1^0, x_2^0\}$，$\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$，满足 $x_1^0 + x_2^0 = 1$，$y_1^0 + y_2^0 + y_3^0 = 1$，$x_1^0, x_2^0, y_1^0, y_2^0, y_3^0 \geqslant 0$，此时 $v^0 = a_{11}x_1^0y_1^0 + a_{12}x_1^0y_2^0 + a_{13}x_1^0y_3^0 + a_{21}x_2^0y_1^0 + a_{22}x_2^0y_2^0 + a_{23}x_2^0y_3^0$，又满足以下两个条件：

(1) 当甲采取混合策略 $\{x_1^0, x_2^0\}$ 时，乙只能采取混合策略 $\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$，不然乙损失更大；

(2) 当乙采取混合策略 $\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 时，甲只能采取混合策略 $\{x_1^0, x_2^0\}$，不然甲赢得更少；就称甲、乙在混合策略定义下达到平衡，$\{x_1^0, x_2^0\}$，$\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 分别称作是甲、乙的最优混合策略。对于任意矩阵对策，是否一定存在这样的最优混合策略呢？

先来考查乙的最优混合策略 $\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 应满足什么条件：

当乙采取最优混合策略 $\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 时，对乙来说，乙的损失(即甲的赢得值)依据于甲采取的混合策略。

如果甲采取纯策略 A_1，即 $x_1^0 = 1, x_2^0 = 0$，则乙的损失值(即甲的赢得值)不会超过 v^0；同样地，如果甲采取纯策略 A_2，即 $x_1^0 = 0, x_2^0 = 1$，则乙的损失值(即甲的赢得值)不会超过 v^0；乙的最优混合策略 $\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 就是使 v^0 尽可能地小，从而有

$$\min f = v^0$$

$$\begin{cases} a_{11}y_1^0 + a_{12}y_2^0 + a_{13}y_3^0 \leqslant v \\ a_{21}y_1^0 + a_{22}y_2^0 + a_{22}y_3^0 \leqslant v \\ y_1^0 + y_2^0 + y_3^0 = 1 \\ y_1^0,\ y_2^0,\ y_3^0 \geqslant 0 \end{cases} \tag{2.62}$$

同样也有

$$\max g = v^0$$

$$
\begin{cases}
a_{11}x_1^0 + a_{21}x_2^0 \geqslant v \\
a_{12}x_1^0 + a_{22}x_2^0 \geqslant v \\
a_{13}x_1^0 + a_{23}x_2^0 \geqslant v \\
x_1^0 + x_2^0 = 1 \\
x_1^0, \quad x_1^0 \geqslant 0
\end{cases}
\tag{2.63}
$$

如果能证明这两个线性规划具有相同的最优解值 v^0，则表明这样的两组 $\{x_1^0, x_2^0\}$，$\{y_1^0, y_2^0, y_3^0\}$ 是存在的。

下面证明线性规划式(2.62)与式(2.63)具有相同的最优值。

线性规划式(2.62)可以化为如下线性规划：

$$
\min f = 0y_1^0 + 0y_2^0 + 0y_3^0 + y_4^0
$$

$$
\begin{cases}
a_{11}y_1^0 + a_{12}y_2^0 + a_{13}y_3^0 - y_4^0 \leqslant 0 \\
a_{21}y_1^0 + a_{22}y_2^0 + a_{22}y_3^0 - y_4^0 \leqslant 0 \\
y_1^0 + y_2^0 + y_3^0 + 0y_4^0 = 1 \\
y_1^0, \quad y_2^0, \quad y_3^0 \geqslant 0
\end{cases}
\tag{2.64}
$$

线性规划式(2.63)可以化为如下线性规划：

$$
\max g = 0x_1^0 + 0x_2^0 + x_3^0
$$

$$
\begin{cases}
a_{11}x_1^0 + a_{21}x_2^0 - x_3^0 \geqslant 0 \\
a_{12}x_1^0 + a_{22}x_2^0 - x_3^0 \geqslant 0 \\
a_{13}x_1^0 + a_{23}x_2^0 - x_3^0 \geqslant 0 \\
x_1^0 + x_2^0 + 0x_3^0 = 1 \\
x_1^0, \quad x_1^0 \geqslant 0
\end{cases}
\tag{2.65}
$$

线性规划式(2.64)即如下线性规划：

$$
\max h = 0y_1^0 + 0y_2^0 + 0y_3^0 - y_4^0
$$

$$
\begin{cases}
a_{11}y_1^0 + a_{12}y_2^0 + a_{13}y_3^0 - y_4^0 \leqslant 0 \\
a_{21}y_1^0 + a_{22}y_2^0 + a_{22}y_3^0 - y_4^0 \leqslant 0 \\
y_1^0 + y_2^0 + y_3^0 + 0y_4^0 = 1 \\
y_1^0, \quad y_2^0, \quad y_3^0 \geqslant 0 \\
y_4^0 \text{ 没有符号限制}
\end{cases}
\tag{2.66}
$$

线性规划式(2.65)即如下线性规划：

$$\min k = 0x_1^0 + 0x_2^0 - x_3^0$$

$$\begin{cases} a_{11}x_1^0 & + a_{21}x_2^0 & - x_3^0 \geqslant & 0 \\ a_{12}x_1^0 & + a_{22}x_2^0 & - x_3^0 \geqslant & 0 \\ a_{13}x_1^0 & + a_{23}x_2^0 & - x_3^0 \geqslant & 0 \\ x_1^0 & + x_2^0 & + 0x_3^0 = & 1 \\ x_1^0, & x_1^0 & \geqslant & 0 \\ x_3^0 \text{ 没有符号限制} \end{cases} \tag{2.67}$$

而线性规划式(2.66),与线性规划式(2.67),是互相对偶的,根据线性规划的对偶理论,它们具备相同的最优值,从而得证。

2.3 多目标规划问题

在一组约束条件下,使一个目标函数达到最优,这是单一目标的规划问题。有时,人们在作决策时,所追求的目标经常不止一个,而是两个或两个以上的目标,而且这些目标之间本质上又经常是不可比拟和相互矛盾的。例如要达到一定的军事目的,既追求对敌产生最大的杀伤效果,又追求我方兵力的最小损耗,等等,因此需要在这两个或两个以上的目标之间进行综合评价、权衡折中,然后给出一个决策。求解这些问题的常用方法是将多个目标化为单目标,将某些目标化为约束条件;在实际操作时的本质困难是各目标之间的量纲不同,确定各目标化为单一目标的权重困难。这类问题的另外求解方法是对这多个目标按照其重要程度,排列成优先顺序,然后逐一求解。然而将多个目标排列优先顺序也是困难的[1]。

当前,求解这类规划问题的一种常用的办法是,首先将目标无量纲化,略去其目标函数的经济学含义,仅仅从数学意义上对多目标向量进行比较。

[例2.6] 某维修站要将一批长10m的棒材,截成长度为3m的毛坯不少于10根,长度为4m的毛坯不少于7根,使用哪种截法才能使所用的棒材根数最少?

显然,有三种不同的截法。截法一:截成长3m的三根,还剩1m废料;截法二:截成长3m的两根,长4m的一根,没有废料;截法三:截成长4m的两根,还剩2m废料。设采用截法一、截法二、截法三的棒材分别是x_1,x_2,x_3根。则线性规划模型为

$$\min f_1 = x_1 + x_2 + x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geqslant 10 \\ x_2 + 2x_3 \geqslant 7 \\ x_1, x_2, x_3 \geqslant 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.68}$$

对于这个单目标规划来说，最优解是 $x_1 = 0, x_2 = 5, x_3 = 1$ ，$\min f = x_1 + x_2 + x_3 = 6$ 。

[例 2.7] 在例 2.6 的基础上，为了开发废料的价值，经市场调查得知，1m 长的废料可卖得 20 元，2m 长的废料可卖得 25 元，希望既追求所用的 10m 长棒材尽可能少，又追求剩余的废料可在市场上买得好收益，从而有

$$\min f_1 = x_1 + x_2 + x_3$$

$$\max g = 20x_1 + 25x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 10 \\ x_2 + 2x_3 \geq 7 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.69}$$

可以将上式化为如下形式：

$$\min f_1 = x_1 + x_2 + x_3$$

$$\min f_2 = -20x_1 - 25x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 10 \\ x_2 + 2x_3 \geq 7 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.70}$$

多目标规划式(2.70)中目标函数的量纲不同，通过探索其经济含义，可以统一量纲，调研得知，每根 10m 长的棒材市场价格为 50 元，则多目标规划式(2.70)可以化为

$$\min f_1 = 50x_1 + 50x_2 + 50x_3$$

$$\min f_2 = -20x_1 - 25x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 10 \\ x_2 + 2x_3 \geq 7 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.71}$$

多目标规划式(2.71)的多目标函数可以化为单目标函数如下：

$$\min f = 30x_1 + 50x_2 + 25x_3$$

从而得到单目标规划如下：

$$\min f = 6x_1 + 10x_2 + 5x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geq 10 \\ x_2 + 2x_3 \geq 7 \\ x_1, x_2, x_3 \geq 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.72}$$

对于单目标规划式(2.72)来说，其最优解为

$$x_1 = 4, x_2 = 0, x_3 = 4, x_1 + x_2 + x_3 = 8, f = 44$$

对于有的多目标规划问题，在实际工作中，不一定追求其中每个目标都要达到

最大值或最小值，有时，可以将目标化为约束条件。例如多目标规划式(2.69)中的 $\max g = 20x_1 + 25x_3$，有时并不追求将废料运到市场上卖得尽可能多的收益，只是希望获得一定的效益，不妨说，市场出售废料的收益不少于 135 元即可，即 $20x_1 + 25x_3 \geqslant 135$，于是多目标规划式(2.69)可以化为

$$\min f = x_1 + x_2 + x_3$$

$$\begin{cases} 3x_1 + 2x_2 \geqslant 10 \\ x_2 + 2x_3 \geqslant 7 \\ 4x_1 + 5x_3 \geqslant 27 \\ x_1, x_2, x_3 \geqslant 0, \text{整数} \end{cases} \tag{2.73}$$

其最优解为

$$x_1 = 3, x_2 = 1, x_3 = 3, f = x_1 + x_2 + x_3 = 7$$

[例 2.8] 设具有三个目标函数的目标规划问题如下：其中决策变量 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 是 n 维向量空间 R^n 上的向量，$\boldsymbol{S}$ 是 n 维向量空间上的向量集合。

$$\begin{array}{l} \min f_1(x) \\ \min f_2(x) \\ \min f_3(x) \\ X \in S \in R^n \end{array} \tag{2.74}$$

为了叙述方便，称上述多目标规划问题为(VP)问题。显然，对于任意一组满足约束条件的决策变量，都对应集合 $\boldsymbol{S}$ 上的一个向量 $\boldsymbol{x}$，于是就可以得到一组数值：

$$f_1(x) = a, f_2(x) = b, f_3(x) = c$$

对于这一组数值，可以用一个三维向量表示：

$$\boldsymbol{F}(x) = (a, b, c)$$

称其为与可行解 $\boldsymbol{x}$ 对应的多目标规划问题的目标值向量。

对于两个可行解 $x^{(1)}, x^{(2)} \in S$，它们的目标值向量如下：

$\boldsymbol{F}_1 = (f_1(x^{(1)}), f_2(x^{(1)}), f_3(x^{(1)}))$，$\boldsymbol{F}_2 = (f_1(x^{(2)}), f_2(x^{(2)}), f_3(x^{(2)}))$

如何比较这两个向量的大小呢？首先给出如下定义。

[定义 2.2] 对于向量 $\boldsymbol{F}_1 = (a_1, a_2, a_3)$，$\boldsymbol{F}_2 = (b_1, b_2, b_3)$，

如果有 $a_i < b_i, i = 1,2,3$，则称 $F_1 < F_2$；

如果有 $a_i \leqslant b_i, i = 1,2,3$，则称 $F_1 \leqslant F_2$；

如果有 $a_i \leqslant b_i, i = 1,2,3$，且至少存在一个 $a_j < b_j, j = 1,2,3$，则称 $F_1 \leqslant F_2$；

例如 $(2,3,1) < (3,5,2)$

$(2,3,1) \leqslant (3,5,2)$

$(2,3,1) \leqslant (2,3,1)$

$$(2,3,1)\leqq(2,3,2)$$
$$(2,3;1)\leqslant(2,3,2)$$

有了定义 2.2,就可以对(VP)问题的解进行比较了。

[定义 2.3] 称 $x^* \in S$ 是(VP)问题的绝对最优解,如果对任意的 $x \in S$,均有 $F(x^*) \leqq F(x)$,如图 2.4 所示。

称 $x^{(0)} \in S$ 是(VP)问题的劣解,如果存在另一个解 $x^{(1)} \in S$,有 $F(x^{(1)}) \leqslant F(x^{(0)})$,如图 2.5 所示。

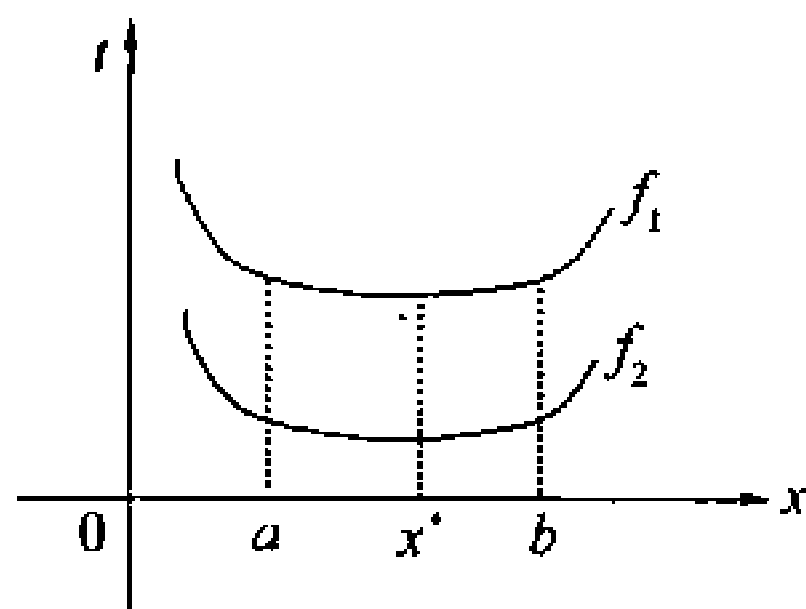


图 2.4　绝对最优解

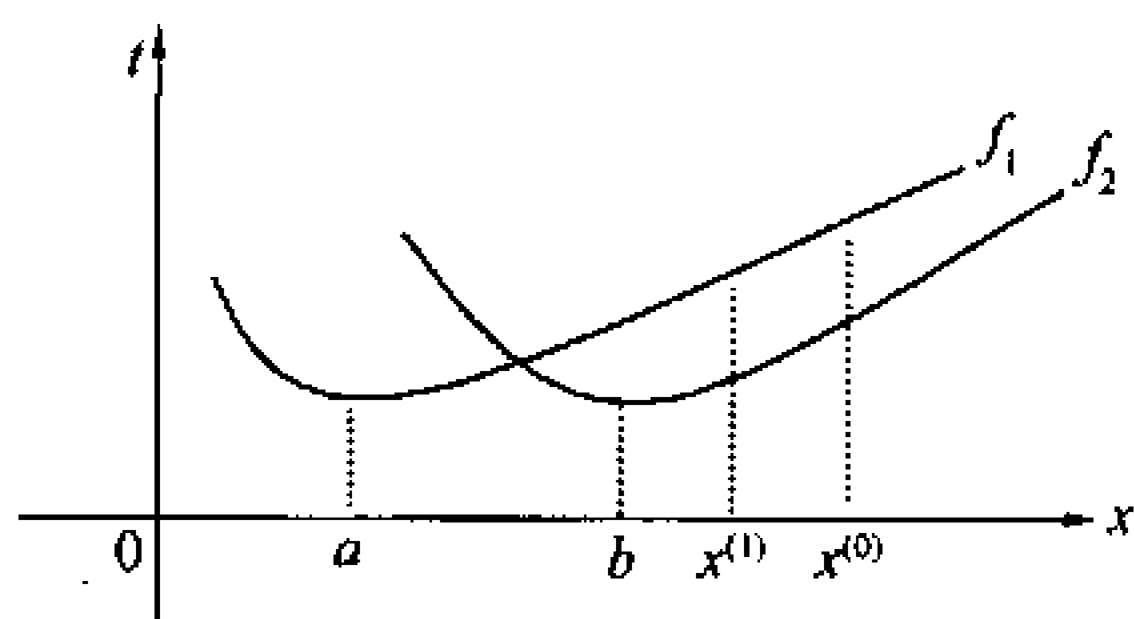


图 2.5　劣解

称 $\bar{x} \in S$ 是(VP)问题的有效解(非劣解),如果不存在另一个解 $x \in S$,有 $F(x) \leqslant F(\bar{x})$,如图 2.6 所示。

称 $\bar{\bar{x}} \in S$ 是(VP)问题的弱有效解,如果不存在另一个解 $x \in S$,有 $F(x) < F(\bar{x})$,如图 2.7 所示。

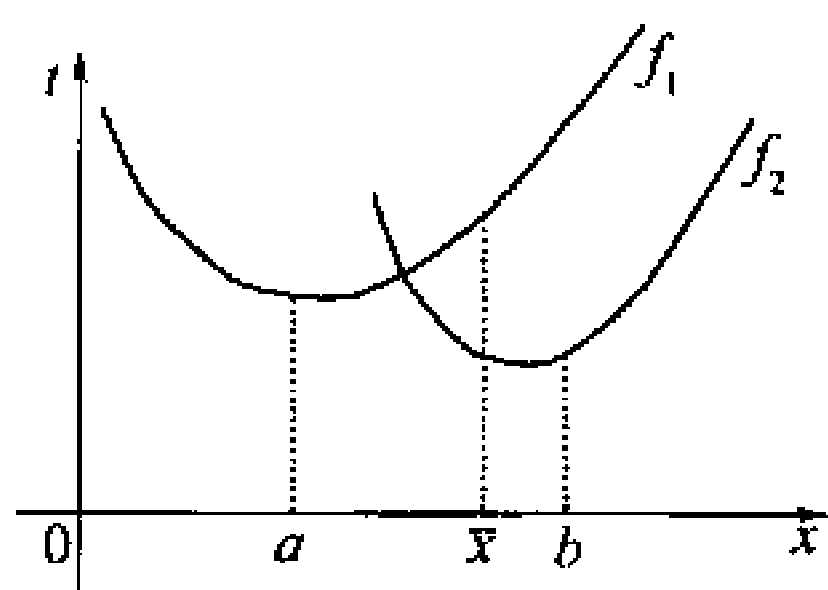


图 2.6　有效解

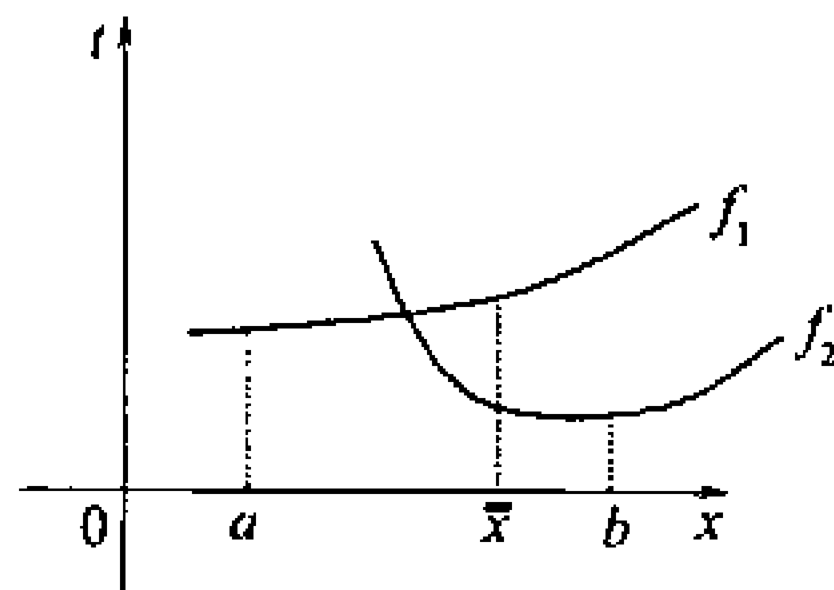


图 2.7　弱有效解

用 S(绝对最优解)表示(VP)问题所有绝对最优解所成的集合;

用 S(有效解)表示(VP)问题所有有效解所成的集合;

用 S(弱有效解)表示(VP)问题所有弱有效解所成的集合。

另外,对每个 $j=1,2,\cdots,P$,用 S_j(最优解)表示单目标规划问题

$$\min f_j(x)$$
$$x \in S \in R^n$$

的最优解所成的集合。

于是有以下结论:

(1) S(绝对最优解) $=\bigcap\limits_{j=1}^{P} S_j$(最优解)。

(2) S(绝对最优解) $\subset S$(有效解) $\subset S$(弱有效解) $\subset S$。

(3) S_j(最优解) $\subset S$(弱有效解),对 $j = 1,2,\cdots,P$ 均成立。

进而,又有以下结论:

(4) $\cup S_1$(最优解) $\cup S_2$(最优解) $\cup \cdots \cup S_P$(最优解) $\subset S$(弱有效解)。

(5) S(有效解) $\cup S_1$(最优解) $\cup S_2$(最优解) $\cup \cdots \cup S_P$(最优解) $\subset S$(弱有效解)。

由上,给出以下结论:

(6) 设 S(绝对最优解) $\neq \varnothing$,则

$$S(\text{有效解}) = \bigcap_{j=1}^{P} S_j(\text{最优解}) = S(\text{绝对最优解})$$

(7) 设 S(绝对最优解) $\neq \varnothing$,则

$$S(\text{弱有效解}) = \bigcup_{j=1}^{P} S_j(\text{最优解})$$

[例 2.9] 项目投资收益论证问题。某部门预计在下一个五年计划期间,投资 9 万元以内,将从三类项目中选择一个项目重点投资,各项目的投资与收益额见表 2.33。

表 2.33 投资收益表

项目	A_1	A_2	A_3	总资金
投资	2	3	5	9
收益	4	9	10	

目标是:收益尽可能大,总的效费比尽可能大。

解:设投资 A_1,A_2,A_3 类的项目各为 x_1,x_2,x_3 个,其中 x_1,x_2,x_3 取值为 0,1;

$$\max g_1 = 4x_1 + 9x_2 + 10x_3$$

$$\max g_2 = \frac{4x_1 + 9x_2 + 10x_3}{2x_1 + 3x_2 + 5x_3}$$

满足
$$\begin{cases} 9 - (2x_1 + 3x_2 + 5x_3) \geqslant 0 \\ x_1,x_2,x_3 = 0,1 \end{cases} \tag{2.75}$$

化为标准形式:

$$\min f_1 = -4x_1 - 9x_2 - 10x_3$$

$$\min f_2 = -\frac{4x_1 + 9x_2 + 10x_3}{2x_1 + 3x_2 + 5x_3}$$

满足
$$\begin{cases} 2x_1 + 3x_2 + 5x_3 \leqslant 9 \\ x_1,x_2,x_3 = 0,1 \end{cases} \tag{2.76}$$

可行解与目标值向量见表 2.34。

表 2.34

可行解	目标值向量		可行解	目标值向量	
	f_1 取值	f_2 取值		f_1 取值	f_2 取值
$x^{(1)}=(1,0,0)$	-4	-2	$x^{(4)}=(1,1,0)$	-13	-2.6
$x^{(2)}=(0,1,0)$	-9	-3	$x^{(5)}=(1,0,1)$	-14	-2
$x^{(3)}=(0,0,1)$	-10	-2	$x^{(6)}=(0,1,1)$	-19	-2.4

可见，

$$F_1(\text{最优点})=\{F^{(6)}\}$$

$$F_2(\text{最优点})=\{F^{(2)}\}$$

$$F(\text{绝对最优点})=F_1(\text{最优点})\cap F_2(\text{最优点})=\varnothing$$

$F^{(1)}$不是弱有效点，也不是有效点，如图 2.8 所示。

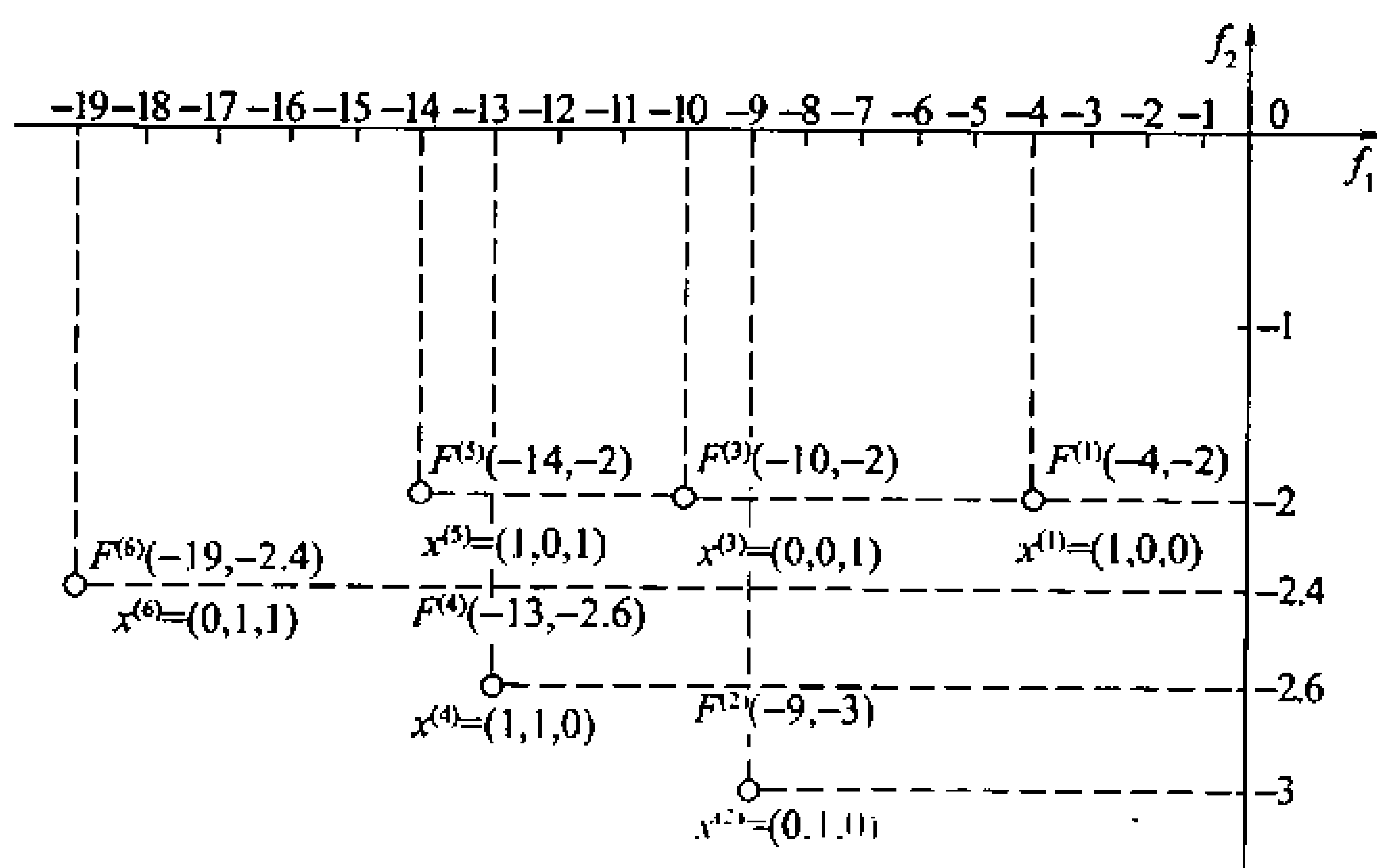


图 2.8　直角坐标系下像集点

上述做法，对于不同量纲的多个目标是可以的。

另外一种做法是采用“理想点”法，就需要将不同量纲的目标值统一化为无量纲。例如将f_1 的各值乘以 $\frac{1}{19}$，将f_2 的各值同乘以 $\frac{1}{3}$，如图 2.9 所示。

如果存在一个可行解同时使f_1、f_2 都达到最优解，是一种理想情况，称为理想最优解，自然是绝对最优解；对于没有最优解的问题，可以假设一个虚拟的“理想点”，例如$f_1=-1$，$f_2=-1$；也可以假设一个虚拟的“负理想点”。常用的方法是，从可行解中寻找一个在欧氏空间中距离“理想点”最近的可行解，作为原问题的“满意解”，或者寻找一个在欧氏空间中距离“负理想点”最远的可行解，作为原问题的“满意解”。

[例 2.10]　现有三个方案，四项指标，这四项指标的权重分别是 0.2，0.3，

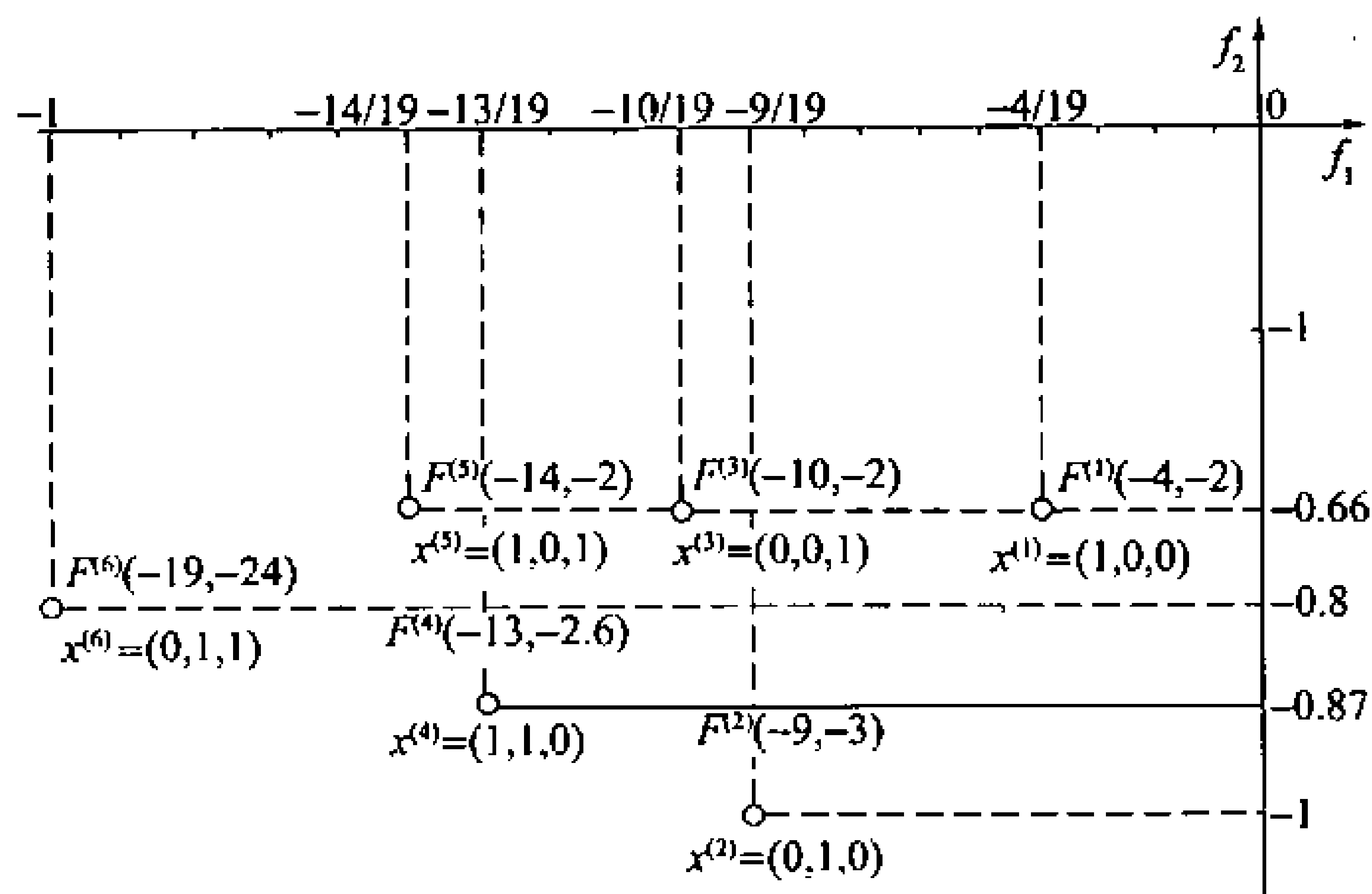


图 2.9　直角坐标系下像集点

0.4,0.1,假设通过以上方法已经剔除了所有劣解,目前都是有效解,这四项指标有的是效益性指标,指标越大越好,有的是成本性指标,指标越小越好,见表 2.35,试给出尽可能好的方案。

表 2.35

指标 方案	f_1	f_2	f_3	f_4
A_1	3	高	5	中
A_2	2	中	4	高
A_3	1	低	2	低

效益性指标 f_1, f_2, 成本性指标 f_3, f_4。

解:首先进行量化,可以将定性指标量化为 1 ~9 之间的数值,也可以将其量化为与已经量化的指标区间相当,如量化为 1 ~5 中间的数值,从而得到表 2.36。

表 2.36

指标 方案	f_1	f_2	f_3	f_4
A_1	3	5	5	3
A_2	2	3	4	5
A_3	1	1	2	1
最优值	3	5	2	1

其中第4个是成本性指标，中、高、低分别量化为3、5、1。表最后一行，是各指标的最好值。

一般地，见表2.37。

表2.37

方案＼指标	f_1	f_2	f_3	f_4
A_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
A_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
A_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
u_j	u_1	u_2	u_3	u_4

构造相对值矩阵 $\boldsymbol{R}=(r_{ij})$，其中 (A_i,f_j) 位置上的元素为

$$r_{ij}=\begin{cases}\dfrac{a_{ij}}{u_j},f_j\ \text{为效益性指标}\\[2ex]\dfrac{u_j}{a_{ij}},f_j\ \text{为成本性指标}\end{cases}$$

表2.36转化为表2.38。

表2.38

方案＼指标	f_1	f_2	f_3	f_4
A_1	1	1	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{3}$
A_2	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{5}$
A_3	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	2	1

然后，对每一个方案，计算它们的综合权重值如下：

A_1: $0.2\times1+0.3\times1+0.4\times\frac{2}{5}+0.1\times\frac{1}{3}=0.693$

A_2: $0.2\times\frac{2}{3}+0.3\times\frac{3}{5}+0.4\times\frac{1}{2}+0.1\times\frac{1}{5}=0.473$

A_3: $0.2\times\frac{1}{3}+0.3\times\frac{1}{5}+0.4\times1+0.1\times1=0.627$

由此可见，方案 A_1 优于方案 A_3，方案 A_3 优于方案 A_2，即 $A_2<A_3<A_1$。

参考文献

[1] 陈庆华.装备运筹学[M].北京:国防工业出版社,2005.

[2] 刘家壮,徐源.网络最优化[M].北京:高等教育出版社,1991.

[3] 谢政,李建平.网络算法与复杂性理论[M].长沙:国防科技大学出版社,1995.

[4] 田丰,马仲蕃.图与网络流理论[M].北京:科学出版社,1987.

[5] 陈树柏.网络图论及其应用[M].北京:科学出版社,1982.

[6] 管梅谷,郑汉鼎.线性规划[M].济南:山东科技出版社,1983.

[7] 刁在筠,等.运筹学[M].北京:高等教育出版社,1996.

[8] 陈庆华,翟晓燕,徐培德,等.组合最优技术及应用[M].长沙:国防科技大学出版社,1989.

[9] 陈庆华.航天发射试验组织指挥网络计划管理系统[J].装备指挥技术学院学报,2000(4).

[10] 王寿云.军事系统工程的理论与实践[M].北京:国防工业出版社,1998.

[11] 张最良.军事运筹学[M].北京:军事科学出版社,1993.

[12] 许国志.系统研究[M].杭州:浙江教育出版社,1996.

[13] 杜玠,陈庆华.系统工程方法论[M].长沙:国防科技大学出版社,1992.

[14] 陈庆华.军事运筹学的发展正面临机遇与挑战[C].中国运筹学会第六次会员大会论文集,2000.

[15] 陈庆华.装备发展的"精明采购"与"精明需求"[J].装备指挥技术学院学报,2002(4).

[16] 宋华文,等.论装备运筹学的形成与发展[J].装备指挥技术学院学报.,2002(4).

[17] 陈庆华,郭全魁,宋华文.装备运筹学教程[M].北京:国防工业出版社,2007.

[18] 《运筹学》教材编写组.运筹学[M].北京:清华大学出版社,1994.

[19] 何建坤,江道琪,陈松华.实用线性规划及计算机程序[M].北京:清华大学出版社,1985.

[20] 胡显佑,严颖,魏权龄.运筹学通论[M].北京:中国人民大学出版社,1987.

[21] Garfinkel Robert S.,Nemhauser Georgel L. Integer Programming,1972.

[22] 陈庆华,等.高等数学[M].北京:高等教育出版社,1999.

[23] 陈廷.决策分析法[M].北京:科学出版社,1987.

[24] 徐南荣,仲伟俊.科学决策理论与方法[M]南京:东南大学出版社,1985.

[25] 齐渲峰.多准则决策引论[M].北京:兵器工业出版社,1989.

[26] Bondy J A,Murty U S R. Graph Theory with Applications[M]. New York:The MACMILLAN PRESS LTD, 1976.

[27] Swamy M N S,Thulasiraman K. Graph,Network and Algorithm[M]. Montreal Canada:1980.

[28] 陈庆华.切断敌方机动线路的最优方案的快速算法[J].装备指挥技术学院学报,2002(1).

[29] 李向东.运筹学——管理科学基础[M].北京:北京理工大学出版社,1995.

[30] 陈庆华.有界容量的运输问题[J].经济数学,1985(2).

[31] 陈庆华.有界容量运输问题表上作业法[J].国防科技大学学报,1986(3).

[32] 陈庆华.战时装备保障运输问题的快速算法[J].装备指挥技术学院学报,2001(6).

[33] Edmonds J. Paths, Trees and Flowers[J]. Canadian Journal of Mathematics, 1965.

[34] 陈庆华,李本海.群决策的模型与过程[J].系统工程,1987(6).

[35] 陈庆华,谢政.整数规划[M].长沙:国防科技大学出版社,1992.

[36] 陈庆华.战时装备损耗预测方法研究[J].装备指挥技术学院学报,2006(2).

第3章　系统分析

第1章论述了系统工程方法论，即系统工程的辩证程序，也是做任何事情的逻辑框。从本章起，将对其中经常用到的子程序展开深入论述。系统分析在各个逻辑程序中都是必要的，本章首先从三个例子入手，通过系统分析，如何将一个类似口号的定性描述的"总目标"，层层分解为具体的分步骤实施的子目标，如何将一个模糊的"提高质量"的概念，通过量化给出便于操作的工作流程。

3.1　实　　例

首先看几个例子。

[例3.1]　让运筹学为部队建设发挥作用

1981年底，老一代科学家许国志院士曾经对作者说："运筹学起源于军事，后来在经济领域得到了发展，而真正让运筹学在我国发挥作用，还必须从部队应用做起，要让运筹学为部队建设发挥作用。"

这句话是一个总目标，不过是一种类似口号的定性描述，具体如何做到让运筹学为部队建设发挥作用，就需要首先将这个总目标层层分解为具体的子目标，并构建起评价其优劣的指标体系，然后勾画出一个路线图，分步骤实施，用一系列的成果说明实现了这个总目标。

许国志大致勾画出的路线图如下：

(1) 在3年左右的时间内，选择试点单位，到基层部队开展推广普及运筹学的工作，举办讲座，合作开展部队训练演习课题研究，从部队现实问题中选择若干个典型问题，为具体的军事行动给出定量分析的优化方案，提高基层部队指挥员的优化意识。

(2) 在5年~10年内，建立与部队、院校和科研院所学术交流的渠道，创建培养运筹学骨干的学科专业，建立开展全军性的运筹学学术交流的学术组织，形成全军开展运筹研究的学术平台。

(3) 在10年~20年内，进一步扩大运筹学为部队服务的层次，跟踪总部关心的若干重大决策问题，用建模与运筹分析的方法，为总部决策提供辅助决策服务。

(4) 在上述理论研究与实践应用的基础上，针对军事活动的某一特殊领域，创建军事运筹学的某一理论与方法体系。

作者从1981年底起，带领研究生和年轻教员，深入部队，合作开展军事运筹研究，研制完成一套用于部队训练演习的《运筹学通用工具软件》，后来获得国家三委一部联合颁发的高技术产品"银奖"，牵头完成的"系统工程模拟系统"成果，获得军队科技进步一等奖。

作者积极参与筹建中国人民解放军军事运筹学学会，于1984年12月，军事运筹学会获得总部批准。作者于1987年1月以书面形式向总部建议，在军事学学科专业目录中，增列"军事运筹学"二级学科，获得总部批准。作者于2001年在总部的支持下，牵头论证在装备指挥领域设置"军事硕士"专业学位的必要性和可行性，获得总部批准，该成果获得全国教育科研成果国家级二等奖。

作者为开展运筹建模的需要，从1987年起，先后牵头完成了《军事运筹学教材》、《组合最优化》、《整数规划》、《系统工程方法论》、《拟阵》、《高等数学》等教材和学术著作；其中《高等数学》教材获得军队教学成果一等奖和国家教学成果二等奖。

作者采用运筹学理论与方法，从2001年起，为总部决策提供辅助支持，先后完成了《武器装备发展与装备人才培养》、《装备运筹理论与应用研究》、《军事航天装备保障研究》、《装备保障能力建设综合论证》等科研成果，先后四次获得军队级科技成果二等奖。

作者于2005年出版了个人学术专著《装备运筹学》，于2007年牵头编著了研究生教材《装备运筹学教程》。

许国志院士对作者提出的让运筹学为部队建设服务的要求，当时看起来只是一个比较空洞的口号式的定性描述的总目标，却是非常重要的，虽然只是一个口号，但它具有明确的指向作用，就是在这一指向下，才勾画出分步骤实施的路线图。随着时间的推移，定性的子目标就会逐渐定量化，路线图也会越来越清晰。

[例3.2]　如何申报科技成果奖

2009年3月19日，作者应北京航天飞行控制中心的邀请，作一专题报告，内容围绕着"如何提高申报科技成果材料整理的质量"，以下是讲课内容。

1. 什么样的科技成果材料是高质量的

军队科技成果是军队科研活动的目的，是军队科研活动的结晶，是评价军队科研人员对军队贡献的重要尺度，也是体现军队科研人员自己价值的重要方面。一个科技创新团体，经过集智攻关，完成了上级交给的科研任务，为装备现代化建设与军事斗争装备准备，做出了贡献，应该说最重要的工作已经完成，往往不注意科技成果的提炼工作。

其实，科研任务攻关完成以后，对科研成果进行认真的分析、梳理、归纳、提炼，在理论上进行提升，在方法上进行总结，形成一份科技成果材料，或是国防报告，或是报奖材料，是非常必要的。一方面供课题研究人员理论学术水平上的提高；另一

方面也为承担其他科研任务的人员提供有益的借鉴。

《国防报告》和《报奖推荐书》不同,《国防报告》主要是给内行人看的,而《报奖推荐书》主要是给外行人看的,各种有利的结论必须有旁证。一份高质量的科技成果材料,当然首先是具有高水平高质量的科研成果作为支撑。一个好的科技成果也必须通过认真梳理成果材料,才能真正反映出成果的水平。一份高质量的科技成果材料,有利于别人了解掌握,学习借鉴,推广应用。要做到这一点,首先必须要素齐全、语言精炼、表述准确、画龙点睛,使人读后印象深刻。

要素,以《军队科技成果奖推荐书》规定的"项目详细技术内容"为例:

(1) 立项背景;

(2) 详细技术内容;

(3) 创新点;

(4) 保密要点;

(5) 与当前国内外同类研究、同类技术的综合比较;

(6) 应用情况;

(7) 经济效益;

(8) 军事(社会)效益。

语言精炼,表述准确,非常重要。经常看到一些成果材料,过程描述的语言太多,话说得很大,没有闪光点,给人的印象最深的是工作量很大,看过听过以后,没有留下任何印象。成果材料中一定要有时间、地点、事件、数据、效果、对比、观点等方面的"警句",使人过目不忘。

2. 成果材料的重点在哪里

成果材料的重点是:

(1) 立项背景;

(2) 重要研究内容;

(3) 创新点;

(4) 评价与应用。

其实就是申报科技奖时,汇报片 PPT 中所规定的四个部分内容。这四个部分的字数与时间的比例基本能够反映出成果材料中各部分的重要性。立项背景:40s,大约 160 字;主要研究内容:60s,大约 240 字;创新点:150s,大约 600 字;评价与应用:90s,大约 360 字;共(1s 读 4 个字)6min,大约 1440 字。

3. 如何提炼成果的精华

提炼成果的精华,就是画龙点睛,就是使人过目过耳不忘的"警句"。注意使用的时间、地点、事件、数据、效果、对比、观点等能使人"警觉"的词汇。整理一个项目的科技成果,或者把看起来联系不够紧密的几个科技成果整理成一个科技成果材料,是课题科研任务的延伸和再创新。整理成果材料的事情,一定要由课题负

责人亲自牵头去做，这是和科研任务攻关同样重要的科研任务。负责人带着年轻人搞科研、整材料，很重要的是培养年轻人，整理材料是对成果的升华。大家都知道，我们在大学里学习的课程，只参加学习，不参加考试，印象就不深刻；只有经过“反刍”才印象深刻。

成果材料的精华集中体现在“创新点”上，推荐书中规定创新点只有400字以内，只有用最精炼的语言才能把最关键的创新点表述出来。创新点一般只写3个～4个，但要分开层次表述，一般来说：第1个创新点，是从宏观任务层次上，功能层面上表述；是立项、背景、目的、意义的提炼。第2、3个创新点，一般是从子系统层面、技术层面、理论方法层面表述；技术攻关的提炼。第4个创新点，一般是从应用层面上表述；是军事社会经济效益的提炼。

4. 如何撰写成果书面材料和汇报PPT

多数情况下，科研任务完成了，要进行鉴定和报奖了，才开始整理材料。其实，科研任务立项前后，撰写成果书面材料和汇报PPT的工作就要开始了。在一项科研任务的申请立项和撰写立项报告时，课题研究的背景就应该很明确了，对于预计完成的成果的目的、意义、理论学术科技水平，以及应用情况就大概有了一个把握，或者更直白地说，就能够预计到这个成果的水平，以及具有冲击几等奖的实力。课题负责人就应该朝着这个方向努力，谋划报奖推荐材料。在课题进展过程中，预计可能的创新点就已经比较明确了，特别是具有工程背景的科研项目，创新点是可以预见的。按照预计的“创新点”，组织力量攻关，组织力量应用，组织力量谋划推荐书。也就是说，推荐书的撰写是从立项论证就开始了，其中各项内容是对预计的“创新点”中四个创新点的细化和展开。

汇报成果时，应该由课题成果的第一完成人亲自汇报，现场回答有关技术创新问题，不仅提高评奖专家对成果的认同度，而且也符合崇尚学术道德的要求。但是，如果所有的报奖成果都到现场汇报，又会带来另外两个问题，一是时间精力投入太大，二是可能引起非公平竞争的后果。无论哪种形式，PPT汇报片都是必要的，请一位播音员作成果解说员可以提升宣传的效果。

科技进步奖评奖活动，对于成果的推广应用，对于激发科技人员的积极性和创造性，会起到一定的作用，但是从操作层面上来讲，又会存在一些不容忽视的弊端。增加评委成员的数量，不是提高评奖客观性和公平性的根本办法，加强管理规范是必要的，创造条件取消不必要的奖项是当务之急。

[例3.3] 如何指导研究生

2008年12月30日，作者应装备指挥技术学院研究生管理部门的邀请，围绕如何提高研究生培养质量，为全院研究生导师安排一次讲座，以下是讲座的主要内容。

作者是1981年底运筹学研究生毕业，分配到国防科技大学，担任了国防科技

大学招收的全军首期运筹学研究生指导老师。1990年3月,调到国防科技大学研究生院,担任学位评定委员会秘书长。1993年4月,调到装备指挥技术学院,参与申报“军事运筹学”硕士点、“作战指挥学”博士点、“军事装备学”博士点。

作者结合“读研究生、带研究生、管研究生”的实践,谈了如何指导研究生的体会。

1. 首先必须对自己所从事的学科专业有一个深刻的了解

在创建军事运筹学学科时,当时学术界对“军事运筹学”学科内涵的理解是比较统一的,军事运筹学是运用数学和计算机等科学手段,为军事活动的科学决策提供定量辅助支持的一门军事学科。

但是在装备指挥技术学院申报“军事装备学”学位授权点时,情况就不同了。全军第一个“军事装备学”博士学位授权点,是总装备部成立以后,由军械工程学院的“军事后勤学”相关的博士点转移过来的。关于“军事装备学”的内涵,已经有多种解释,已经从不同的角度进行了描述。

军事科学院给出的军事学学科分类方法,以及制订的军事学项目申报指南与国家社科基金项目指南等,主要面向军事科研。《中国军事百科全书》是面向具有中学以上水平的读者介绍古今中外军事知识的工具书,主要依据的是知识体系,由于编写工作量十分浩大,需要借助于业务部门的机关管理职能,因此最终的成书,也充分体现了机关管理部门的业务分工。

从国务院学位委员会设置研究生培养学科专业的目的来看,军事装备学与已经设置的“系统工程”、“军事运筹学”、“管理科学与工程”、“武器系统与运用工程”、“国防经济学”、“作战指挥学”、“军事教育训练学”、“军事法学”、“军事思想及军队历史”、“军队管理学”等学科专业既关系密切,又有明显区别。它以军事装备的管理活动为研究对象,是研究军事装备建设、管理和保障活动的理论与实践及其规律的一门军事学科。

这里所说的“装备建设、管理和保障”,是指装备全寿命全系统的管理活动,是“大管理”的概念,包括装备发展论证、装备科研试验、装备采购监造、平时的装备维修管理、战时的装备保障指挥等。也就是说,军事装备学本质上属于管理学门类,目前列在军事学门类中,主要是突出其军事装备管理活动的特殊性。从管理的角度来讲,军事装备学的理论基础与应用方法离不开运筹学与系统工程。从应用领域来讲,用定性与定量相结合的方法,研究装备管理活动中的决策优化问题,为总部决策服务,为部队建设和部队作战能力提升服务,这是军事装备学的特点。从学位授予来讲,军事学门类范围太大,太不具体,对于一位被授予“军事学硕士学位”的研究生,使用单位很难通过他获得的军事学学位得知其特长。他有可能是研究历史的,有可能是研究政治思想工作的,有可能是研究战术的,有可能是研究装备维修的。建议进一步理顺军事学门类的学科划分,按照一级学科授学位。目

前在后装分离的前提下，军事后勤学、军事装备学应该分别成为一级学科，将来，后装合一以后，应该合为一个一级学科——军事保障学。

2. 积极鼓励研究生不要局限于导师的研究视野

导师应积极鼓励所指导的研究生，主动地向本学科专业的其他导师学习，向校内其他学科专业的导师学习，向军内外其他学科专业的专家教授学习，开展跨部门、跨单位、跨学科的协作。作者在国防科技大学指导过一名研究生——周经伦，导师交给他的课题研究任务是关于运筹学算法理论的，又鼓励他跟着另外一位教授去研究可靠性理论，该研究生毕业后不久，就晋升为教授，成为国内这两个领域的专家。

作者在国防科技大学指导过另外一个研究生——汪德虎，是大连海军舰艇学院的年轻教员，导师告诉他不要丢掉自己的本科专业，而应该发挥本科专业的长处，运用运筹学与系统工程的方法，研究舰炮指挥方面的问题，在原来平台上再上一个新台阶。该研究生取得了很好的成绩，研究生毕业后不久就晋升为教授，成为他原来学科专业上的博士生导师，2007 年他指导的一篇博士论文被评为全军优秀博士论文。

作者在装备指挥技术学院指导的一名军事硕士研究生——乔文华，是来自海军潜艇部队的，导师鼓励他立足于本单位所从事的岗位需求，运用研究生阶段学习的专业知识，研究新型潜艇的装备维修保障问题。该研究生不仅完成了学位论文，而且对所从事的业务工作起到了很好的推动作用，所完成的论文于 2007 年被评为全军优秀硕士学位论文。

作者指导的博士生吕彬，结合本职工作完成的论文 2008 年被评为全军优秀博士论文，2009 年被评为全国优秀博士论文。

3. 引导研究生从部队建设和部队作战能力提升的实践中遴选和落实研究课题

当前研究生来源渠道多，学科基础差别大，入门门槛低，这对于导师来说，是一个不能回避的问题。通过研究生阶段的学习和完成学位论文，达到可以参加全军乃至全国统一度量的水平，这实在不容易。指导每一名研究生，都是导师的一次创造性活动，有时需要扬长补短，有时需要扬长避短。应该针对每位研究生的特点，鼓励研究生结合部队建设的现实问题，确定其论文选题。随着装备现代化建设与军事斗争装备准备的不断推进，将有大量的军事斗争的现实问题需要研究解决，这就要求军事装备学研究生不仅要掌握一般的研究方法和具有一般的研究能力，而且一定要具有较强的研究解决装备现代化建设和军事斗争装备准备等现实问题的能力。

最重要的是贯彻落实科学发展观，只有这样，才能在复杂的现实问题中理出头绪，形成定性的认识，有了定性的认识，才能为建模与定量分析指明方向，通过定量分析，验证或进一步深化原有的定性认识，从而最终形成研究解决现实问题的有效

途径。

积极鼓励研究生,在导师指导下,通过撰写课题申请报告,申请课题。在申请课题前,对我军装备建设和军事斗争装备准备中存在的问题和不足,进行深入调研,搜集和学习相关的课题研究资料,从而能够更好地了解课题相关的军事需求。

特别是,对于军事装备学专业来说,应用性实践性很强,应注意引导研究生从部队当前存在的重大问题入手,研究提出对策建议,推动部队的装备建设。也就是说,军事装备学研究生学位论文选题一定要有军事需求的背景,要有国家部委、军委总部正式下达的课题支撑。论文选题即使没有正式下达的课题,最起码是为了争取立项而进行的有目的的"预先研究"、"自主研究",不能是"研究生自拟课题",多年的实践证明,"研究生自拟课题"往往是造成论文质量不高的原因。

这里需要说明的是,有两类选题:一是"看病",二是"制药"。

针对当前存在的问题"对症下药",提出一种有效的解决方法,这是"看病"。不针对某一种特定的问题,而是研究一种普适的"药方",可以为"医生"提供"医治多种疾病"的"药剂",这是"制药"。

最不可取的是,直接拿来自己并不熟悉的别人的"药方",就去"治疗"自己并不熟悉的"病人"。不去对"病人"进行深入的"诊断",不去对"药方"的应用范围和具体"疗效"进行分析,只是想当然地根据自己想象和别人的结论进行综合。另外一种值得注意的倾向是,论文选题过分偏重于某种工程技术方法,如研制一种通信工程使用的芯片、一种接口技术,或者在仿真环境建设中研究一种通用的声光电技术,等等。我曾审读过一篇博士论文,如果不看论文的题目,通读全文,不可能想到这是一篇军事装备学的博士论文。

作者认为当前更应该鼓励研究生,研究解决"看病"的问题,通过我军装备建设中某一领域某一问题研究现状的分析,明确课题研究的意义,借鉴国内外该领域的经验教训,通过定性与定量相结合的分析,提出有价值的研究结论,然后给出对策建议,为我军的装备建设提供辅助决策服务。

按照这样的思路进行论文研究,论文的题目一般至少包含三个领域的关键词:装备管理的寿命期,涉及不同层次规模系统的装备管理活动,主要采用的定性定量方法。例如,空军工程大学2009届军事装备学博士论文《基于可信度的空军武器装备研制方案评估研究》,装甲兵工程学院2009届军事装备学博士论文《陆军战役级装备作战并行仿真研究》,军械工程学院2007届军事装备学博士论文《一体化作战通用装备保障训练理论研究》。第一个关键词应该是关于装备管理寿命期的,如装备研制、装备论证、装备采办、装备保障、装备维修、装备退役,等等;第二个关键词应该是涉及层次规模系统的,如陆军战役级、一体化作战、空军装备、通用装备,等等;第三个关键词应该是采用的方法,如运筹优化、模拟分析、兰彻斯特方程,等等。

"申报课题、研究课题、评审课题、鉴定课题、推广课题、申报成果",经历这一全过程,开展创新性研究,培养坚实宽广的理论基础、系统深入的专门知识,以及独立从事科研的能力。

4. 鼓励研究生在论文基本完成后广泛征询专家的指导与帮助

研究生论文基本完成后,导师应积极鼓励他们,在保密的前提下,在院内外、军内外就某些观点和结论征询专家的意见,多方请教,特别是向那些敢于发表不同意见的专家请教。

导师在推荐同行评价专家时,也应该特别注意邀请那些敢于发表不同意见的有真才实学的专家,请教不同学术观点的专家来参加讨论、评阅、预答辩,这对于研究生最后完成高质量学位论文至关重要。

作者曾指导过一名研究生,对一位盲评专家提出的问题不是很信服,认为盲评专家认识上有偏颇。导师就对他说,这位盲评专家提出的问题是对的,至少说明研究生本人对这个问题没有阐述清楚,使得别人产生歧义。

在正式答辩时,导师还特别建议聘请持不同观点的专家来参加答辩,经过认真的交流与答辩,研究生的论文又上了一个台阶,答辩专家对这个问题的看法也趋于一致。与其关起门来让人家在门外说你不好,不如把人家请进家里,心平气和地交换意见,甚至是思想认识交锋,最后总会在更高的层次上取得一致。一个人有多大的胸怀,就有多大的发展空间。

作者在国防科技大学工作时,曾经对答辩专家组成提出了一个建议,后来被许多同事采纳。任何一次答辩,都要请三类专家。

一类是德高望重的老专家,他们可以从论文的整体结构、选题意义、应用价值、文献引用、图表格式、书写编排等方面给一个宏观的把握。看它是不是一篇合格的学位论文。

另一类是该研究领域的实力派专家,他们可以对研究生的创新点给予实事求是的评价,以发现学位论文的闪光点。这类专家的提问,往往能起到画龙点睛的作用。

还有一类是爱挑毛病的专家,他们有真才实学,能够发现论文研究的致命伤。这样的专家很难请到,特别是名气很大的导师,要请到一位敢于给自己的研究生出难题的专家,实在不易。研究生导师最应关注的恰恰就是要请到这样的专家。

我们不应担心研究生论文盲评不通过,只请不提问题的专家当评审专家。这样做,论文倒可能是顺利通过了,那么后来呢,有可能对于研究生、导师、答辩专家、学科点、学院名声等,留下隐患,更不要说对部队建设的危害了。

答辩中,最容易起颠覆作用的问题是"论文有抄袭现象",如某个观点、数据、公式、图表,没有在论文的正文中注明出处,或者不能自圆其说。"论文有抄袭现象"与"论文水平不高"是两个不同的概念,"论文水平不高"是能力问题,"论文有

抄袭现象”是学风问题。另外，“水平不高”的论文，没有自己的创新性成果，为了拼凑篇幅，必然是大量地使用参考文献，又不注明出处，就涉嫌“抄袭”。从这方面来说，“水平不高”的论文，多半是“抄袭”拼凑的。

一门课程考不过，可以重修；开题报告没有通过，还有下一次；盲评没有通过，再继续努力；答辩没有通过，可以申请延期；实在读不下去，可以退学；退学不能说明这个学员不好，只能说，这样的培养模式对它不适合。所有这些，总比埋下隐患要好。

当然，作为导师，总是希望自己的每个学生都能够尽快成才，最好能在导师所从事的学科领域中成才，成为导师牵头的学术创新团队的成员，或者能够在其他行政管理领域有大的发展。

3.2 系统分析的概念

当今世界上，美国等发达国家都运用系统分析方法研究武器系统，军事指挥系统、空间技术系统、能源系统、交通系统、通信系统、科学研究系统和各种社会管理系统等，日益发挥出巨大作用。为了有效地、成功地应用系统分析方法，就必须了解什么是系统分析、系统分析的结构形式、系统分析要解决哪些问题以及采用什么方法和工具等。

系统分析有广义与狭义之分。广义系统分析是把系统分析作为系统工程的同义语，有的学者就把系统工程称作系统分析；狭义系统分析是把系统分析作为系统工程的一个逻辑步骤，这个步骤是系统工程的核心部分。本书认为，“系统分析”和“系统工程”，这两个概念是不同的，但在具体使用“系统分析”这个概念时，有时又很难将两者区分开，不管是何种解释，都可以看出系统分析的重要性。系统分析是系统工程的重要标志。

“系统分析”(system analysis)一词最早是在20世纪30年代提出的，当时是以管理问题为主要应用对象。到了40年代，由于它的应用获得成功，得到了进一步的发展。以后的几十年，无论是研究大系统的问题，还是复杂的新系统，都广泛应用了系统分析的方法。由于系统分析在各个领域和各种类型问题中的应用不断扩展，不同专业领域的实际工作者和专家结合本身的经验，应用系统的思想，摸索出了多种多样的分析和解决问题的方法，从而对系统分析的含义或定义产生了不尽一致的看法。

主要有以下几种定义[2-7]：

(1) 苏联在1963年出版的《哲学辞典》认为：对系统(系统客体)的分析是现代各种科学的特征之一。苏联有的学者认为，系统分析是现代科学认识的一种强大武器，它能使人们在完全崭新的基础上，由统一的系统分析对自然界任何复杂过

程进行研究。

(2) 希契(C. Hitch)认为:系统分析是运筹学的扩展,系统分析提供了利用各个领域专家的知识来综合解决问题的途径。运筹学用于解决目标明确、变量关系简单的近期问题,系统分析用于解决更为复杂和困难的远期问题,但系统分析和运筹学分析在基本内容上有共同点。

(3) 兰德公司(RAND)曾提出:系统分析对于运筹学的关系犹如战略对于战术的关系。

(4) 奎德(E. Quade)对系统分析作了这样的描述:系统分析是一个比较复杂的,不大匀称的,不怎么有条理的程序,这种程序很难适合于定量最优化。事实上,总体分析的过程基本上是一个大范围综合的过程。在这个过程中,要预测环境,建立方案,发现作战规律。因此,人们可以运用系统分析方法,把广泛的、长远的、高级的"目标选择"问题,同"战略选择"、"定性判断"以及"协助逻辑思考"联系在一起。

奎德对后面这个定义作了如下说明:系统分析,只通过一定的步骤,帮助决策方案的一种系统方法。这些步骤是:研究决策者提出的整个问题,确定目标,建立方案,并根据这个方案的可能结果,使用适当的方法(尽可能用分析方法)去比较各个方案,以便能依靠专家的判断能力和感性知识去处理问题。随着技术计划和研究报告的不断完善,将继续使决策者付出更大的精力去认识"最优途径",并提出关于最优途径的建议。该过程的具体框图如图 3.1 所示,它包含有五项基本内容:可行方案集、系统目标体系、系统建模、效果和信息、评价准则。

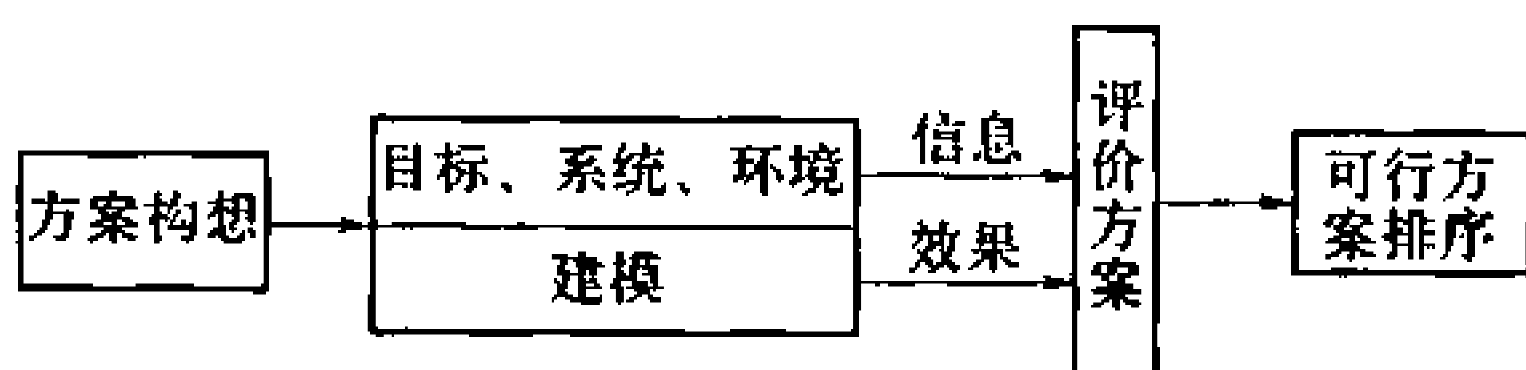


图 3.1　系统分析过程框图

在分析一个具体问题时,往往不是一次分析循环就能全部解决问题,而是要通过多次反复的分析循环才能得到较为满意的结果。分析循环的内容如图 3.2 所示。

(5) 尼古拉诺夫(S. Nikoranav)认为:系统分析要解决的基本问题是选择一个最适用的替代方案来实现使高层决策人更有效地控制和利用资源。这种替代方案(往往含有大量的变量和不确定因素)的选择必须保证完整性和可测性,为此必须采用数学模型和计算机技术。该定义的具体内容有 11 项,即问题的提出、对问题各相关因素的估计、目标和约束系统的确定、制定评价准则、该问题所特有的系统结构的确定、分析系统中的关键因素和不利因素、选择可能的替代方案、建立模型、提出求解过程的流程、进行运算并求得具体结果、评价结果和提出结论。

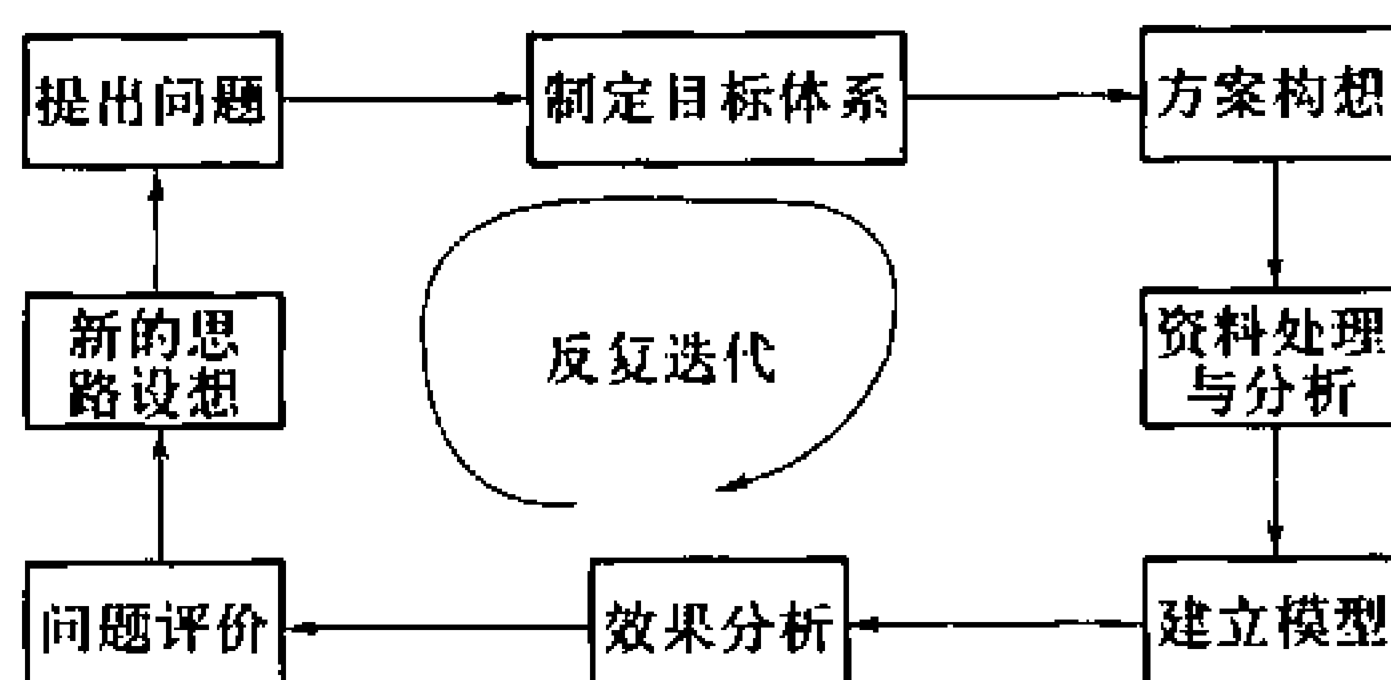


图 3.2　多次反复的分析循环

(6) 科弟科特(P. Coldicott)认为:系统分析是了解系统在有效利用各类资源时所产生的有效变化或可能的替换,而这些有价值的信息是借助于计算机技术实现的。

(7) 克罗(R. Krone)认为:系统分析可被视为由定性、定量或两者相结合的方法组成的一个集合,其方法论源于科学方法论、系统论以及为数众多的涉及选择现象的科学分支。应用系统分析的目的在于改进人类组织系统的功能。

(8) 切克兰德(P. Checklard)认为:系统分析是系统观念在管理规划功能上的一种应用。它是一种科学的作业程序或方法,考虑所有不确定的因素,找出能够实现目标的各种可行方案,然后,比较每一个方案的费用效益比,通过决策者对问题的直觉与判断,以决定最有利的可行方案[8]。

(9) 菲茨杰拉德(J. Fitzgerald)认为:系统分析方法是分析和评价系统中各个决策点就系统的效果所产生的各种影响和制约。决策点,就是系统中那些能对输入数据做出反应和能做出决策的点(可以是人或自动装置)。因此,在系统分析中,一个系统的设计是以各种决策点为依据的。图 3.3 所示的是一个供暖系统,其中的决策点是指太热和太冷两个控制部件。它可以是自动装置,也可以由人来操作。

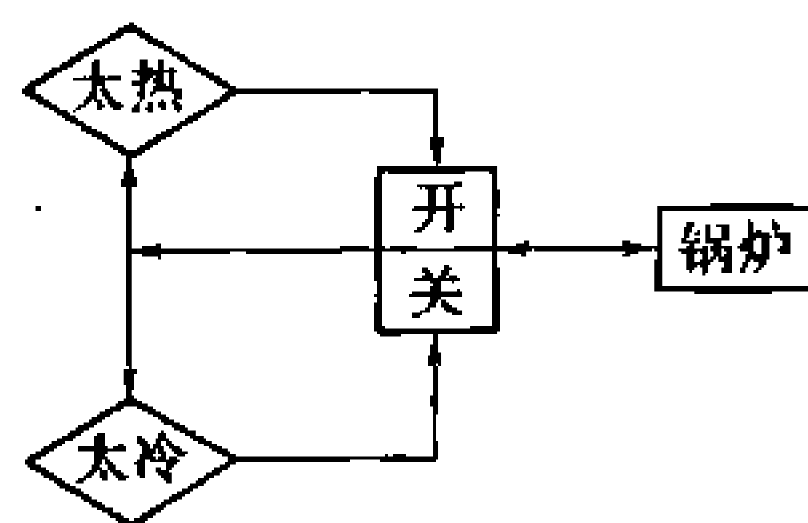


图 3.3　供暖系统

(10) 唐明月认为:系统分析是一种对系统进行信息处理的方法。系统分析的过程是希望对所研究的问题尽可能缩减信息量,并保证能充分反映该系统的信息品质。在理想状况下,一个系统在决策时最后所剩下的信息量(亦即决策者必须面对的信息量)应等于此系统不可知的信息量。

(11) 宋健认为:系统分析是研究系统结构和状态的变化或演化规律,即研究系统行为的理论和方法[9]。

(12) 汪应洛认为:系统分析是一个有目的、有步骤的探索过程;目的是为决策者提供直接判断和决定最优方案的所需信息资料;步骤是使用科学方法,对系统的目的、功能、环境、效益等进行充分的调查研究,把试验、分析、计算的各种结果,同

预期的目标进行比较,最后整理成完整、正确、可行的综合资料,作为决策者择优的主要依据[6]。

诚然,还可以列举出一些系统分析的定义,可是所有这些定义到目前为止都不能令人满意。那么,系统分析到底是什么?看来,只能是从论述系统分析的目的和任务、解决问题的过程和方法及研究的对象等方面出发,来了解系统分析的概念和内容。

现在,按提出的时间顺序,对上述12种有关系统分析的定义和概念做一归纳。

在20世纪50年代,是将系统分析与运筹学作对比,认为系统分析是运筹学应用的扩展,两者之间的关系犹如战略对于战术的关系。

在20世纪60年代,认为系统分析是一种研究方法,它有本身的内容,可以通过目标、可行方案集、模型、效应和评价准则等连成一体,由数学模型和计算机实现,处理一些较大规模的事件或问题。

在20世纪70年代,将系统分析与决策相联系,作为解决层次较高、难度较大的大系统问题的手段。

在20世纪80年代以后,系统分析不但应用于多层次、大规模的复杂系统,而且还考虑以人为中心的系统行为。系统分析与决策紧密相连,强调研究系统的整体结构和行为过程。它通过各种方法来减少决策者对问题不清楚或无把握的程度,力争使之达到尽可能清晰的认识,以便于决策。系统分析已成为当今决策分析的核心内容。

本书认为,应该首先提出系统分析的目的、方法和任务,然后在此基础上对系统分析做出定义。

系统分析是系统工程中主要的一个逻辑程序。系统分析的目的是为决策者决策服务的,即系统分析是为了发挥系统的整体功能及达到系统的总目标,采用科学合理的分析方法,对系统的环境、目的、功能、结构、费用与效益等问题进行深入的调查,细致的分析、设计和试验,经过不断的分析和探索,从而制定出一套经济有效的处理步骤或程序,或提出对原有系统进行改进的方案,或提出决策者关心的某项工程的设想和建议等,以此为决策者提供决策所需的信息和资料。为了达到上述目的,系统分析者首先应该对研究对象进行充分的调查。此基础上,进行系统环境、系统目标、系统结构等方面的分析,找到系统存在的主要问题,同时,还要采用定性分析方法、定量分析方法或定性和定量相结合的方式,建立必要的系统分析模型,进行综合分析、全面评价和优化可行方案,这样才能为决策者选择最优方案或满意方案提供可靠的依据。

系统分析的实质:① 应用科学的推理步骤,使系统分析中任何问题的分析均能符合逻辑原则,合乎事物发展规律,而不是仅凭决策者的主观臆断和局限的经验。② 用数学的方法和以计算机为工具,使各种方案的分析比较,不仅具有定性的描述,

而且基本都能进行定量分析,以具体的数量概念来显示各方案的差异。③ 系统分析的结果,能在一定条件下充分挖掘潜力,从而能做到人尽其才,物尽其用,借以设计出最优的系统方案,如图 3.4 所示。

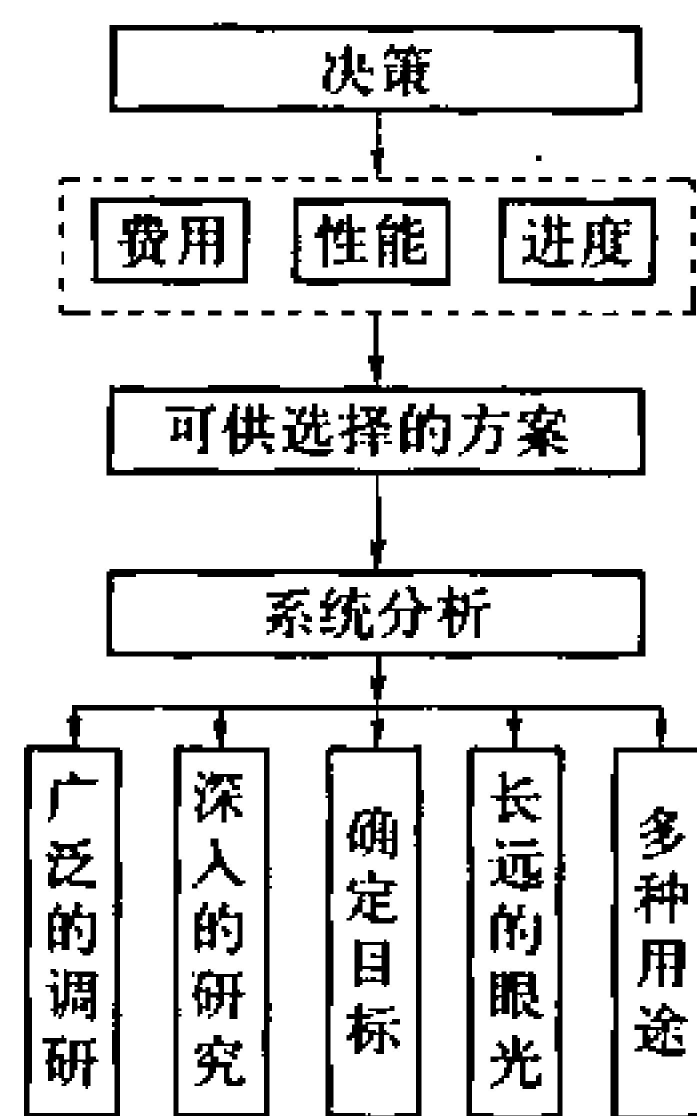


图 3.4 系统分析框图

3.3 系统分析的要素和步骤

3.3.1 系统分析的要素

系统分析的要素是指系统分析过程中涉及的要素,一般有六个要素[5,6]:

(1) 问题。问题常表现为现实情况与理想境界之间的差别。人们为了改变现实,达到理想的状况,便会产生需求目的。只有明确了问题的性质和范围。系统分析才有了可靠的起点。

(2) 目标。就是为了达到目的所应完成的具体事项,是系统目的具体化。目标是系统分析和决策的出发点和落脚点。在系统分析时,首先必须全面了解和明确所要分析问题的目的和当前的目标,同时确定系统的构成和范围以及系统的功能。

(3) 替代方案(可行方案)。一般情况下,为实现某一目的,总会有几种可以采取的方案和手段,这些方案既可以彼此之间相互替代,又可以代替所研究的系统,故称之为替代方案或可行方案。替代方案往往是一个集合,它是优选的基础,没有足够数量的替代方案,就不可能有优化。拟定多种实现目标的方案,进而进行分析比较,选优是系统分析的工作内容之一。

(4) 模型。它是描述对象和过程的某一方面的本质属性的,是对客观世界的抽象描述。它可将复杂的问题简化为易于处理、能够试验或调整的形式。使用模型进行分析,是系统分析的基本方法。

（5）标准。即评价指标，是评价方案优劣的尺度。标准必须具有明确性、可计量性和敏感性。明确性是指标准的概念明确、具体、尽量单一，对方案达到的指标，能够做出全面衡量。可计量性是指确定的衡量标准，应力求是可计量和可计算的，尽量用数据表达，使分析的结论有定量的依据。敏感性是指在多个衡量标准的情况下，要找出标准的优先顺序，分清主次，尤其应找出对输出反应非常敏感的输入，以便控制输入达到更好的输出和效果。根据标准对方案指标进行综合评价，最后可按不同准则排出方案的优先顺序。

（6）决策 。有了不同标准下的方案的优先顺序之后，决策者还要根据分析结果的不同侧面，个人的经验判断，以及各种决策原则进行综合的整体的考虑，最后做出选优决策。各种决策原则包括当前与长远利益相结合；局部和整体效益相结合；内部和外部条件相结合；定量和定性相结合。

系统分析的这六个要素，可组成系统分析的概念结构图，如图3.5所示。这个结构图从概念上表明了系统分析的工作内容和步骤。

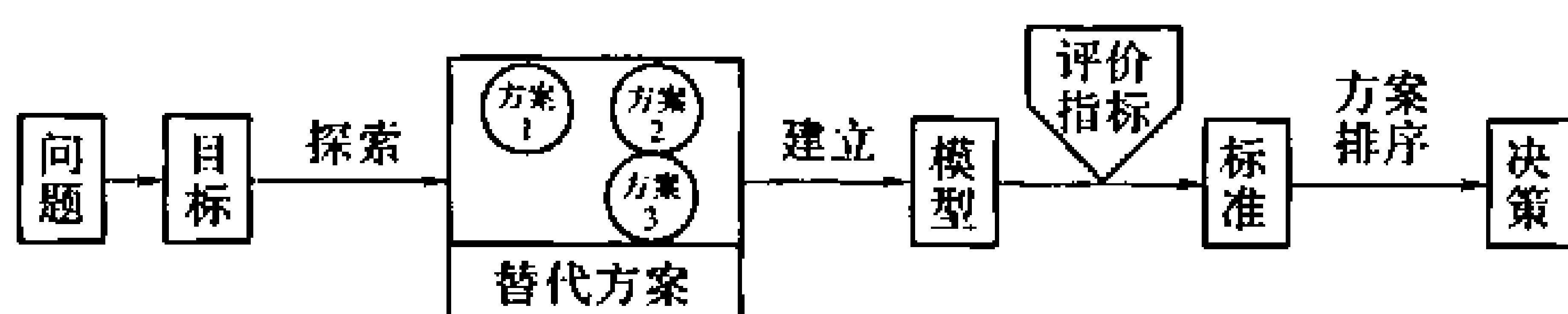


图3.5 系统分析概念的结构

3.3.2 系统分析应该避免的问题

系统分析应该避免以下弊病[3]：

（1）问题定义不明确；

（2）问题定义不恰当；

（3）系统范围规定得不合适；

（4）方案有重大缺陷或方案个数太少；

（5）准则不适当；

（6）立场不公正；

（7）数据不真实；

（8）模型不正确；

（9）模型使用不当；

（10）对相关因素处理不当；

（11）采用了不正确的假设；

（12）忽视了不确定因素；

（13）样本不足；

（14）缺少反馈；

(15) 没有及时与决策者对话；

(16) 各自为政，缺少联系；

(17) 忽视了主观因素；

(18) 过早地得出结论等。

3.3.3 系统分析的步骤

系统分析是一项系统性和逻辑性较强的工作，是一个有步骤地探索、分析和创造的过程。尽管系统分析时，不同的分析者由于专业经验和价值观念不同，对同一问题，即使采用同样的分析方法，也可能得到不一样的结果。尽管如此，探讨系统分析的步骤仍然是有意义的和必要的。每一次系统分析都或多或少地由一些典型的相互关联的行为构成。根据实践经验，可以将系统分析过程的典型行动概括成图 3.6 所示的逻辑结构。它包括五个步骤：①阐明问题；②谋划备选方案；③预测未来环境；④建模和预计后果；⑤评比备选方案。它的整个过程可归纳成阐明问题、分析问题、评价比较三个阶段。阐明问题阶段的工作结果是提出目标，确定评价指标和约束条件；分析问题阶段提出各种备选方案并预计一旦实施后可能产生的后果；最后阶段将各方案的评价比较结果提供给决策者，作为判断抉择的依据。下面对系统分析的各个步骤[6]展开讨论。

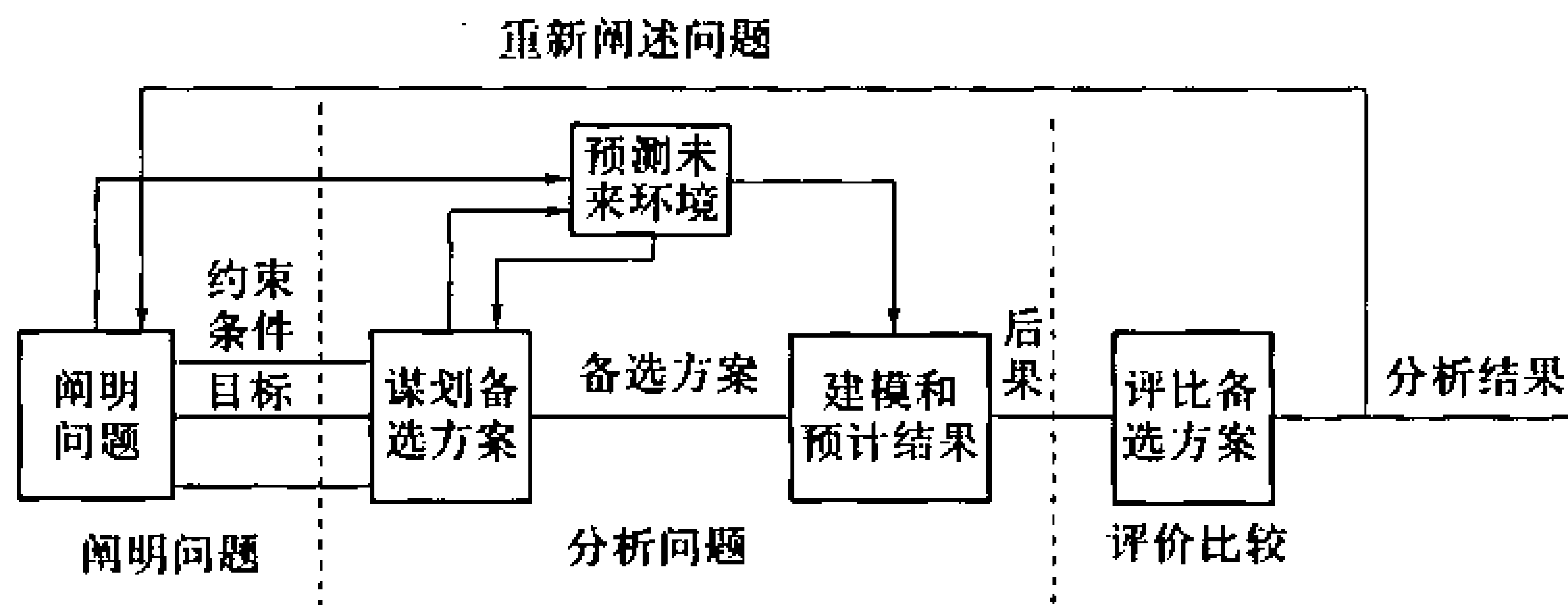


图 3.6 系统分析的逻辑过程

1. 阐明问题阶段

阐明问题阶段本身就是一项小规模的系统工程，需要分析研究目标结构、价值观念、约束条件、备选方案、方案后果及人们对后果的反应等。阐明问题阶段的主要内容如图 3.7 所示。

2. 谋划备选方案

每项系统分析都需比较多个备选方案（不采取任何行动，保持原状也可称为一种方案）。可以说，没有两种以上的方案就不成为系统工程问题。系统工程人员即使面临似乎毫无疑义的唯一选择，都不能轻易地承认方案的唯一性，要思考其他可能的备选方案，要研究这种“唯一”方案的缺陷。

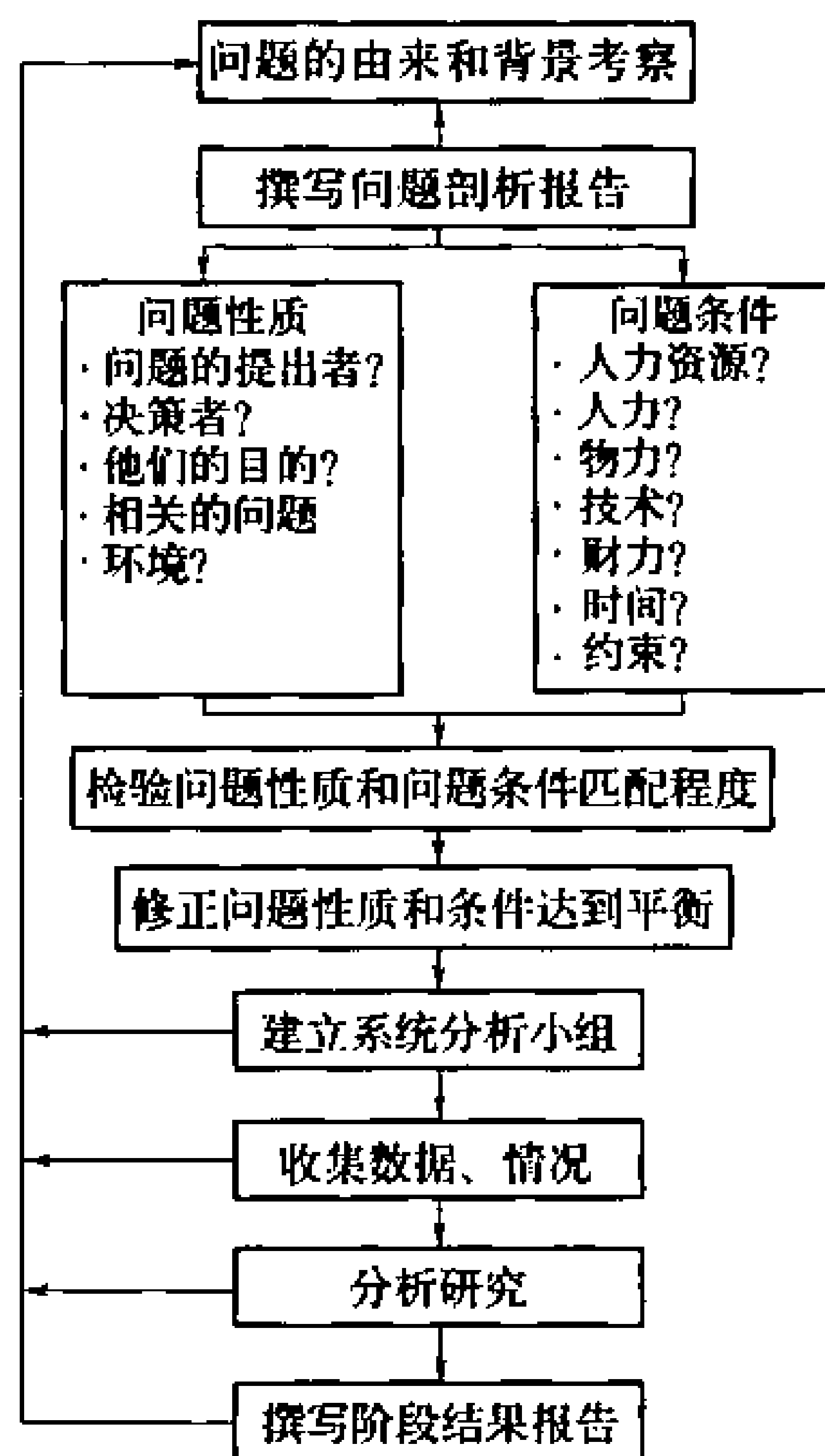


图 3.7　阐明问题阶段的主要工作

谋划备选方案包括方案的提出和筛选过程。方案提出有多种渠道。决策人或问题提出人的意见和设想是渠道之一。系统工程人员在调查研究过程中可以收集到各种意见。再者,分析者本人也可提出若干备选方案。然而,任何一种备选方案的提出和形成都有赖于系统工程人员的分析和概括能力、想象力、创造力以及对现实的深刻了解。例如,关于减少青少年犯罪活动问题,教育、电影、电视内容、书刊管理、民警监督、住房、社会福利等各个方面采取的措施都可能单独地或相互组合地形成一个方案。在这里,没有一个固定模式,这需要分析者去探索和概括。

备选方案筛选过程中往往要采取专家评判的方法。系统工程小组(或专家组)一致同意删去比一致同意选取的做法更容易行得通,经过讨论将一些不可行的或太敏感的方案删去,在谋划备选方案阶段结束后提出少数几个(一般以 3 个为宜,不超过 5 个)方案供详细分析研究。同时,在分析过程中,自始至终要注意发掘新的更好的方案,分析者既要谨慎从事,又要有勇气提出创造性的建议。总之,良好的备选方案是进行良好系统分析的基础。而在系统分析过程中自始至终要意识到,需要而且可能发现新的更好的备选方案,这是得到出色分析结果的关键。

3. 建模和预计后果

每种备选方案都相应有一系列后果。这些后果都是通过各方面的指标来衡量

的，有的后果有助于达到目标，有的则是消极的，有些后果对选定的目标影响甚小，但涉及其他决策者和组织者的利害关系，有的后果满足近期目标，但其作用可延续较长时间并妨碍长期目标的实现。可见，系统分析者不能局限于某个决策者的具体目标，应从较广范围来考察后果。另外，由于系统工程人员受时间、精力和财力的限制，不可能全面考察各方面的后果。因此，本阶段的首要"决策"便是确定应该预计哪些后果？其中哪一项最重要？后果的作用时期该考虑多久？

4. 预测未来环境

每项系统工程都需要预测各种备选方案的后果，而每种方案的后果和将来付诸实践时所处的环境有关。环境指的是决策人无法控制的自然、经济、社会和技术的未来状态。预测未来环境通常采用情景分析法。

情景分析是就某一主体或某一主题所处的宏观环境进行分析的一种特殊研究方法。概括地说，情景分析的整个过程是通过对环境的研究，识别影响研究主体或主题发展的外部因素，模拟外部因素可能发生的多种交叉情景以分析和预测各种可能前景。

情景分析方法的特点和应用如图 3.8 所示。

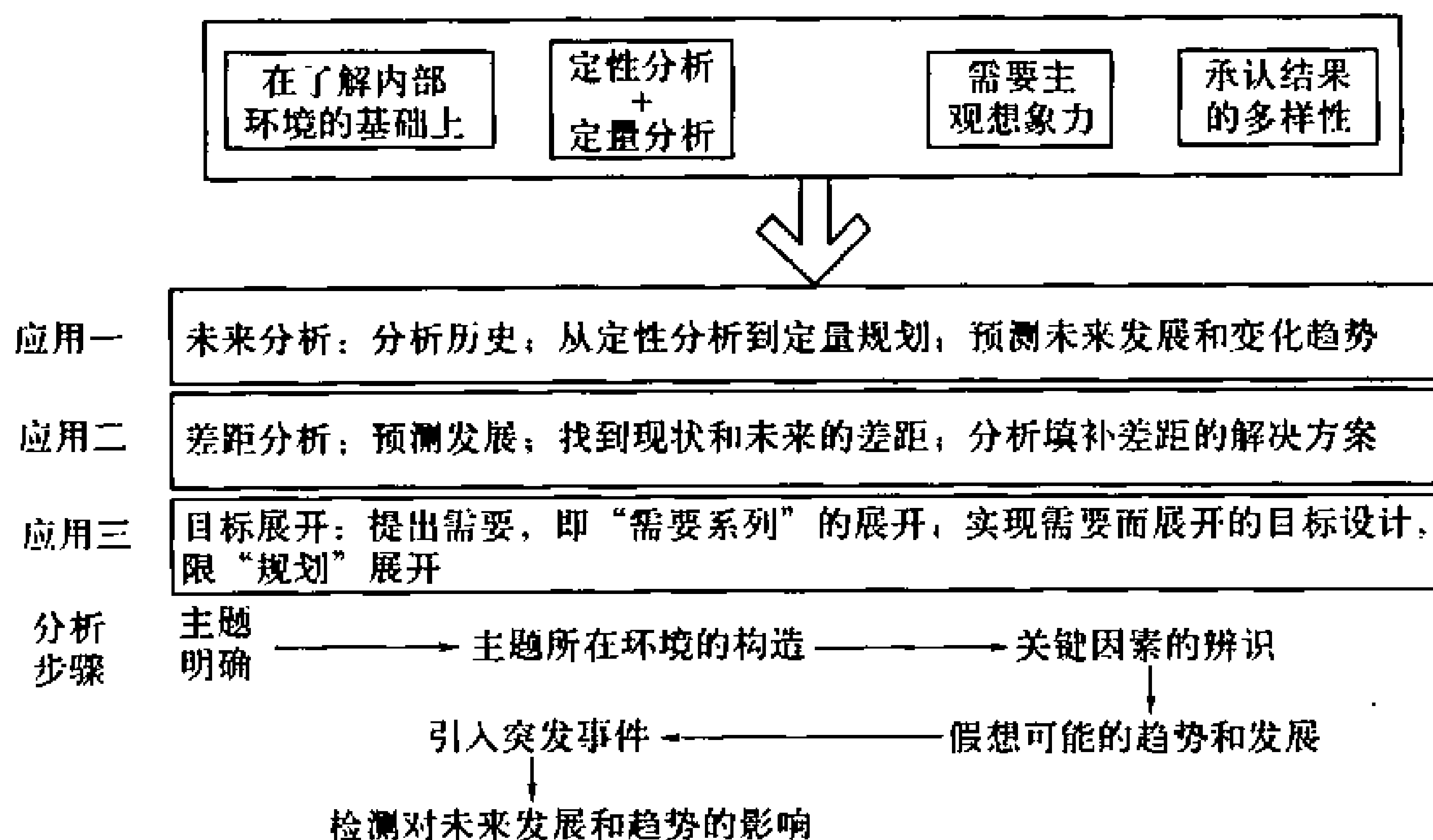


图 3.8　情景分析法的特点和应用

现以三峡水利工程为例预测未来环境，在建造三峡水利工程前系统工程分析人员对工程选址的未来环境作出如下归纳[3,10]：

(1) 政策环境。

① "十二大"的总方针；

② 国民经济发展和水利电力需求；

③ 可持续利用长江水利电力资源的方针。

(2) 物理技术环境。

① 气候条件(降雨量、水流速度、风级、平均气温),坝高对形成四川盆地降雨的暖湿气流的流向和流量的影响;

② 航道(现状、稳定性、水位);

③ 岸滩河势(岸滩、河势稳定性、河床保持的难易程度);

④ 回淤(泥沙含量、淤积量、清淤条件、两岸及上游水土保持与流失);

⑤ 地质条件(软土层厚度、硬石层深度);

⑥ 两岸建筑物(围堰、码头、居民区、历史文化旧址);

⑦ 规模(蓄水量、发电量、舵船吨位、船型适应性);

⑧ 运行与维修(航行、过闸、发电运行、排沙、维修与安全)。

(3) 经济环境。

① 总投资额与分期投资额;

② 建设周期;

③ 投资回收期;

④ 每年可提供的发电量和灌溉面积、可创造的年利润和税金;

⑤ 对农业、工业、渔业、旅游业、航运业、重庆市、长江流域、全国经济、国际贸易的收益影响;

⑥ 对上海市长江入海口附近造地速度和上海市发展用地的影响。

(4) 对两岸城市及地区的规划与发展。

① 重庆市及辖区市县的规划与发展;

② 对周边的省市规划与发展;

③ 对库区的生态环境保护的规划与发展。

(5) 与全国交通网络的联系。

① 连通铁路、公路、内河、海港、航空港的交通条件;

② 货物运输、电力供应、水利灌溉等配置与流向的合理性。

(6) 资源环境。

① 符合国家能源政策的程序;

② 对上游、下游地区能源的影响;

③ 需投入能源(煤、油、电、设备、建筑材料);

④ 需征用的森林、土地资源;

⑤ 需迁移的历史文化资源;

⑥ 移民与开辟新居民区的费用;

⑦ 源头及上游可提供的水资源;

⑧ 工程项目施工力量与技术水平。

(7) 环境保护。

① 淤积泥沙的实时清除与利用；

② 污染物的清除与处理；

③ 对原生态和次生态的保护；

④ 对风景区、名胜古迹的影响。

(8) 与国内重大项目的关系。

① 与南水北调工程的关系；

② 与西气东输工程的关系；

③ 与南方核电站工程的关系。

(9) 军事。

① 与库区军事防御建设的关系；

② 与未来可能突发的战争的关系；

③ 对周边社会治安与国家安全的考虑。

5. 评比备选方案

各种备选方案在不同情景下的后果估计出来后，便可对方案进行评比。方案的评比和选择密切相关。但在系统工程中，这两部分工作是由不同人员完成的。系统工程人员有责任对各种方案进行评估并尽可能排出优先次序。但做出选择乃是决策者的权利和职责。如果决策者选择的只是系统工程人员列为第三、第四的方案，那并不奇怪，因为决策者的价值观和偏好并不可能为系统工作人员完全理解，甚至会误解。只要决策者根据系统分析列出的后果选择他满意的方案，这就说明系统工程的分析结果是成功的。系统工程人员的目标不只着眼于选择一个最优方案，而是提供一组最接近于满足决策者目标的方案，给出足够的后果信息。

方案评比后，决策前的系统工程工作就告完成，方案选择不一定包括在内。当然，在方案的实施过程中，特别在开始阶段或环境发生变化的情况下，还会要求系统工程人员参加，方案实施结果的评价也离不开他们，但不一定是原班人马。

以上讨论了系统分析的三个阶段(阐明问题、分析问题和评价比较)和五个步骤。在绝大多数系统工程中，这五个步骤不可能一次就完成，需要迭代调整，分析过程的中间结果甚至最终环节的结果可能迫使分析者去改变最初的假设，修正原先的工作或收集新的数据。

在整个系统分析和迭代调整过程中，系统工程人员要不断和决策人对话，这是系统工程成功与否的关键因素。决策人不仅对目标、约束的设定最有发言权，而且要在各分析阶段对许多中间结果做出判断，这是系统工程人员替代不了的。由于双方经常对话，决策人及委托人等会感到自己也参与了分析工作，了解分析过程中涉及的各种重要问题，因此，一旦分析得出一些意料之外的或违反本意的结果，决策人也不致因惊讶或抵触而拒之门外，不予考虑。

还需指出，并非所有系统分析都要完全按照上述五个步骤进行，有些成功的系

统工程可能只涉及其中一部分环节。

参考文献

[1] 哈肯.H.信息与自组织[M].成都:四川教育出版社,1988.

[2] 陈宏民.系统工程导论[M].北京:高等教育出版社,2006.

[3] 孙东川,林福永.系统工程引论[M].北京:清华大学出版社,2004.

[4] 董肇君.系统工程与运筹学[M].2版.北京:国防工业出版社,2007.

[5] 汪应洛.系统工程[M].3版.北京:机械工业出版社,2003.

[6] 汪应洛.系统工程理论、方法与应用[M].2版.北京:高等教育出版社,2002.

[7] 杨家本.系统工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2002.

[8] 切克兰德.系统论的思想与实践[M].左晓斯,史然,译.北京:华夏出版社,1990.

[9] 宋健.航天纵横—航天对基础科学的拉动[M].北京:高等教育出版社,2007.

[10] 肖艳玲.系统工程理论与方法[M].北京:石油工业出版社,2002.

[11] 陈庆华,郭全魁,宋华文.装备运筹学教程[M].北京:国防工业出版社,2007.

[12] 杜玠,陈庆华.系统工程方法论[M].长沙:国防科技大学出版社,1992.

[13] 李霖.军事装备学概论[M].北京:国防工业出版社,2001.

[14] 喻湘存,熊曙初.系统工程教程[M].北京:北京交通大学出版社,2006.

[15] 周德群,等.系统工程概述[M].北京:科学出版社,2005.

第4章　系统预测

在系统工程方法论的逻辑程序中，系统预测占有重要的地位，无论是环境变化的分析，还是各种方案对环境变化的适应情况的分析，都要进行系统预测。本章从两个例子的分析入手，说明系统预测是经常碰到的，又是非常重要的。系统预测虽然没有固定的方法，但是掌握一些常用的方法也是必要的。

4.1　实　例

首先看两个例子。

［例4.1］　海潮预测

地处山东半岛北部、渤海南岸的某边防排驻地，1968年底迎来了由一批应届大学毕业生组成的某炮兵连队，连队的营房就建在一条流向渤海的小河旁，用沙土堆积成为一座山丘，作为营区，开荒种地，练兵习武。本书作者也是这个连队的成员，负责喂猪、放鸭子。

1969年4月20日，突然刮起东南风，大风连续刮了三天，接着又连续刮了三天东北风。本书作者向连长报告说，海潮可能要来了，请求把猪转移到高坡上的备用猪圈里。连长问：为什么说海潮要来了？作者说，请连长看这张山东地形图，如图4.1所示。

图4.1　渤海湾的东南风东北风

渤海的东南方向是由山东半岛与辽东半岛所形成的海峡，三天东南风把黄海

里的海水吹到了渤海里，接着三天东北风又把渤海里的海水吹到渤海南海岸莱州湾。而渤海的南海岸莱州湾是一大片沼泽地和一望无际的耐盐碱的野草，地势平坦低洼，人烟稀少，这样一来，海水就借着东北风势向山东半岛的北部地区袭来，由于地势平坦、落差不大，海水可以长驱直入，可能一直能冲到海岸线以南30里远的昌邑县城。连长觉得有道理，不仅转移了猪圈，而且加固了营房的堤坝。果然不出所料，海潮来了，暴风雨来了，1969年4月23日，24日达到高峰，气温骤降，电线先是变成棒槌粗的冰玻璃，接着电线杆子一个接着一个地垮塌，海水冲进了淡水池，冲垮了通往外面的道路，整个连队驻地成为一个孤岛。值得庆幸的是，虽然营区是一个孤岛，但由于加高加固了营区堤坝，海水没有进入营区，也没有人员伤亡，连队饲养的猪也安然无恙。

本书作者对连长说："再换成三天的西南风就好了，海潮退得会更快些。但是，那样的话，海城、营口就可能发生地震了。"为什么呢？因为大量的海水涌向东北方向，由于辽东半岛的阻挡，海水集中压迫在没有沼泽地缓冲的辽东半岛西侧，地壳应力发生变化，地震就可能发生，如图4.2所示。

1969年7月18日，13:24，渤海湾发生7.4级地震，震中在山东省老黄河口以东海域，地震造成102人死亡，353人受伤。

三天西南风

图4.2　渤海湾的海潮

大家知道，海岛上的火山或地震造成的巨大能量把海水推向四面八方，可能引起海啸；海啸以后，大量的海水在长途跋涉过程中，又将动能转化为势能，然后又裹携着更多的海水从四面八方返流回来，就可能在火山地震发生地附近产生第二次灾害——地震。

2004年12月26日，上午8时，印度尼西亚苏门答腊岛北部海域，发生8.7级地震，引起的浪高达40m的海啸，经过两个多小时，抵达马尔代夫、斯里兰卡、印度等国的沿海岸，当日中午12时26分，尼科巴群岛又发生了7.5级地震。

2010年2月27日，智利发生8级以上地震，曾有人在互联网上对世界上近期

发生的三次大地震的日期排列成一张表格，见表 4.1。

表 4.1　神奇的矩阵表

地　点	月　份	日　期	
汶川	$a_{11}=5$	$a_{12}=1$	$a_{13}=2$
海地	$a_{21}=1$	$a_{22}=2$	$a_{23}=2$
智利	$a_{31}=2$	$a_{32}=2$	$a_{33}=7$

这张表中的月份日期是一个关于主对角线的对称矩阵，横看与竖看都是 512，122 和 227。看起来很神奇。

其实没有什么神奇的，关键的是三阶矩阵中 $a_{12}=a_{21}$，从而具备了对称的基础。只要是 2 月份 20 日以后发生的地震都具有对称性，从 2 月 20 日，2 月 21 日，2 月 22 日，2 月 23 日，2 月 24 日，2 月 25 日，2 月 26 日，2 月 27 日到 2 月 28 日都是对称的。智利是强烈地震高发地带，从这方面来讲，日期的对称性就不奇怪了。其实智利的地震破坏性并不严重，开始智利总统甚至表示不请求国外的救援，也可以说，智利大地震在宣扬方面有人为炒作的痕迹。

火山、地震、海啸，给人们的活动造成的影响有时是灾难性的，海岸线曲折、地形复杂、气候多变的地方，往往是灾难频发地，因为灾难频发，生活在这里的人们也就变得很聪明。

[**例 4.2**]　平时生活中的预测

平日工作学习中，可以在不经意的情况下，开展预测活动，有一次本书作者在大型超市的门口停留了几分钟，发现每 100 个成年人顾客中，有 70 个女人，30 个男人。其中这 30 个男人大多数是陪女人来逛街的，极少数是单身男人，而且都是匆匆来商店购物就走的人。这 70 个女人中，接近 30 个与成年男人一起逛街，有 30 多个是独自一人，另外有 10 个左右的女人是带着孩子来的。男人如厕一次平均 30s，女人如厕一次平均 5min，商店里的女厕是不是应该大一些呢？

1997 年夏天的一个下午，本书作者乘公交车到达北京市东二环东直门附近，站在过街天桥上，不经意地观察记录着过街天桥下从东向西行驶的汽车。发现平均每 5 辆汽车中就有 1 辆出租汽车。作者随后拦住一辆出租汽车，上车后询问司机，北京共有多少个出租汽车公司，答曰：“1000 多家。”又问：“每个公司出租汽车的拥有量是多少？”答曰：“60 辆到 70 辆。”作者立即可以猜测北京市现有汽车的拥有量是 30 多万辆。

预测的方法不是固定的，预测对象是随机的，如有一位同事说，曾经看过一份材料，有人依据一个人头发是否“谢顶”，可以分析他的性格，并由此根据头发的“少—多—少”的变化规律，预测领导人的更替，据说准确率比较高。也有人依据“文武之道，一张一弛”的规律，预测领导人的更替，据说准确率也很高。其实每一

次预测都是一次创造性的活动，观察一件事物的发展趋势，是常用的预测方法。预测中，记忆和联想是重要的，记忆力好，就能记住很多事物，但这还不够，还必须善于将不同事物的发展变化联系起来去想。预测必须具有两种能力，记忆加联想。

在谈到人类起源时，一位同事说，人类可能不都是"猴子"变来的，只有黄种人可能是吃水果谷物的"猴子"变来的，白种人可能是吃肉的"北极熊"变来的，黑种人可能是吃鱼的"海豚"变来的。在谈到人类发展历程时，一位同事说，自然界是不是已经提供给我们一把钥匙呢，或者是一个密码。月亮绕地球一圈所用的时间是一个月，我们将这个时间长度记作 1 个 t；假设 1 个 T 与之对应。

从一个受精卵到婴儿出生所需要的时间是 10 个 t，实际上蕴涵着一个密码，即地球上出现单细胞的生物体到出现动物所需要的时间是 10 个 T。

从婴儿出生到学会爬行所需要的时间是 8 个 t，实际上蕴涵着一个密码，即地球上从出现动物到出现爬行动物所需要的时间是 8 个 T。

从婴儿出生到直立行走所需要的时间是 12 个 t，实际蕴涵着一个密码，即地球上从出现动物到直立行走的人类所需要的时间是 12 个 T。

直立行走与学会说话几乎是同时的，蕴涵着人类的出现同时就产生了语言。

只要知道了 T，其他时间就可以类推出来了。

4.2 系统预测概述

无论是对系统做出规划和进行分析，还是对系统进行设计和决策，首先要对系统的各有关因素进行预测。通过预测，可以获得系统的必要信息，为科学的逻辑推断与决策，提供可靠、正确的依据。因此，系统预测是系统工程中非常重要、必不可少的一项工作。

4.2.1 系统预测的概念

在介绍系统预测的概念之前，首先通过"海因里希法则"来了解系统预测的重要性。

"海因里希法则"又称"海因里希安全法则"或"海因里希事故法则"，是美国著名安全工程师海因里希提出的 300∶29∶1 法则。这个法则意思是说，若一个企业有 300 个隐患或违章，必然要发生 29 起轻伤或故障，在这 29 起轻伤事故或故障当中，必然包含有 1 起重伤、死亡或重大事故，如图 4.3 所示。这一法则也可以逆序表述用于企业的安全管理上，即在一件重大的事故

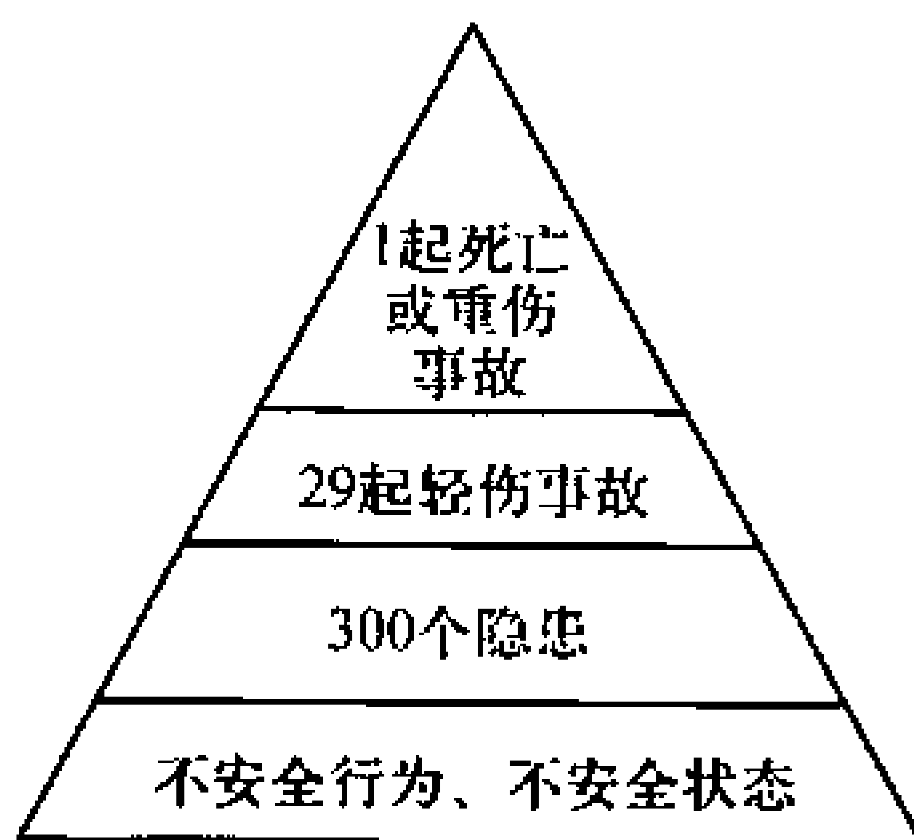


图 4.3 "海因里希法则"

背后必有 29 件“轻度”的事故，还有 300 件潜在的隐患，1000 件不安全行为。可怕的是对潜在性事故毫无觉察，或是麻木不仁，结果导致无法挽回的损失。了解“海因里希法则”的目的，是通过对系统进行预测，让人们少走弯路，把事故消灭在萌芽状态。

由“海因里希法则”，可以看出，系统预测是系统最优化的前提和基础，因此只有做好系统预测工作才能防患于未然，及时发现问题，分析未来的发展趋势，找到正确的途径，才能使系统整体效能达到最优。

预测(forecasting)是预计未来事件的一门艺术，一门科学。它包含采集历史数据并用某种数学模型来外推将来。它也可以是对未来的主观或直觉的预期。它还可以是上述的综合，即经由良好判断调整的数学模型。与求神问卦不同，科学预测是建立在客观事物发展规律基础之上的科学推断[1-3]。

在设计一个新系统或改造一个旧系统时，人们都需要对系统的未来进行分析估计，以便做出相应的决策，即使是对正在正常运转的系统，也要经常分析将来的前途和发展设想。对系统的未来进行分析估计，也就称为系统预测。系统预测是以系统为研究对象，根据以往旧系统或类似系统的历史统计资料，运用某些科学的方法和逻辑推理，对系统中某些不确定因素或系统今后的发展趋势进行推测和预计，并对此做出评价，以便采取相应的措施，扬长避短，使系统沿着有利的方向发展。

科学预测的方法和手段称为预测技术。预测技术在近几十年日益受到重视，并逐渐发展成为一门独立的、比较成熟的应用性很强的科学。它对于长远规划的制定、重大战略问题的决策以及提高系统的有效性等，都具有极其重要的意义。

4.2.2 系统预测的步骤

预测的步骤随预测目的和使用方法的不同而不同。一般来说，预测的程序有以下几个步骤，如图 4.4 所示[1-3]。

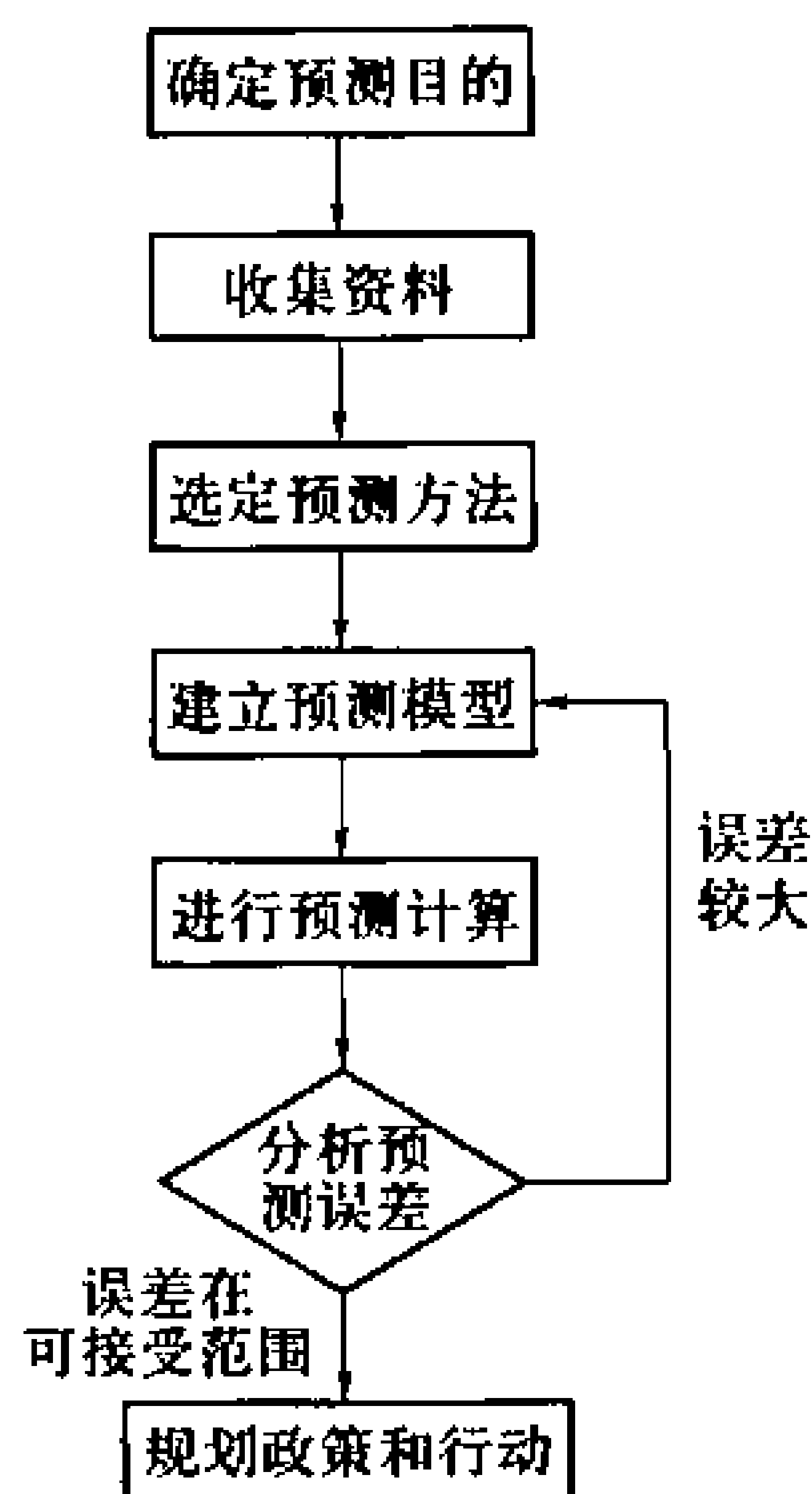


图 4.4 预测的步骤

1. 确定目的

进行预测，首先必须确定预测的具体目的。只有目的明确，才能根据预测目的去收集必要的资料，决定适当的工作步骤，选用合适的方法。

2. 收集和分析有关资料

资料的收集工作是由预测的具体目的所决定的。一般来说，资料的收集要求完整、准确、适用。数据的收集和分析是发现系统发展规律和系统各要素之间关系的关键，是科学预测方法的基础。

3. 选择预测方法

对不同的预测对象应当采用不同的预测方法。选择预测方法时，主要考虑预测对象的种类和性质、对预测结果精度的要求、现已掌握资料的可靠性和完整性，以及现实条件（人力、物力、财力和时间期限）等，经过分析，合理选择预测效果好、经济又方便的预测方法。在可能的情况下，最好能对同一预测对象采用不同的预测方法进行预测，以便比较分析。

4. 建立预测模型

预测的核心是建立符合客观规律的数学模型，即通过对资料的分析、推理和判断，揭示所要预测对象的结果和变化，根据实际情况和需要做出必要的假设，建立反映预测对象内部结构、发展规律的模型，并对模型进行检验，确定模型的适应性。

5. 进行预测

根据所建立的模型或公式进行预测计算。在进行预测计算的前后，都应认真分析模型内外因素的变化情况。如果这些变化使预测对象的未来显著地不同于过去和现在，就需要根据分析判断，对预测模型或结果进行必要的修正。

6. 分析预测误差

由于实际情况受多方面因素的影响，而预测又不可能将所有因素均考虑在内，故预测结果往往与实际值有一定的差距，即产生预测误差。虽然，预测允许有一定的误差，但如果误差太大，预测就失去了实际意义，所以需要认真分析产生误差的程度及原因，并进行必要的修正。

7. 改进预测模型

如果预测结果与实际值出现较大的误差，这往往是由于所建立的预测模型未能准确地描述预测对象的实际情况。出现这种情况，就需要对原有的预测模型进行修改或重新设计。同时，如果实际情况发生了较大的变化，原有的方法也必须重新选择。

8. 规划政策和行动

预测的目的一般不只是为了设想未来的情况将会怎样，更重要的在于根据对未来情况的设想和推断，制定当前的行动和相应的政策，以便影响、控制以至改变未来的情况。

4.3 定性预测方法

定性预测是一种直观性预测。它主要根据预测人员的经验和判断能力，不用或仅用少量的计算，即可从对被预测对象过去和现在的有关资料及相关因素的分析中，揭示出事物发展规律，求得预测结果，如图 4.5 所示。定性预测也称为意向预测，是依靠经验、知识、技能、判断和直觉对事物性质和规定性进行预测。

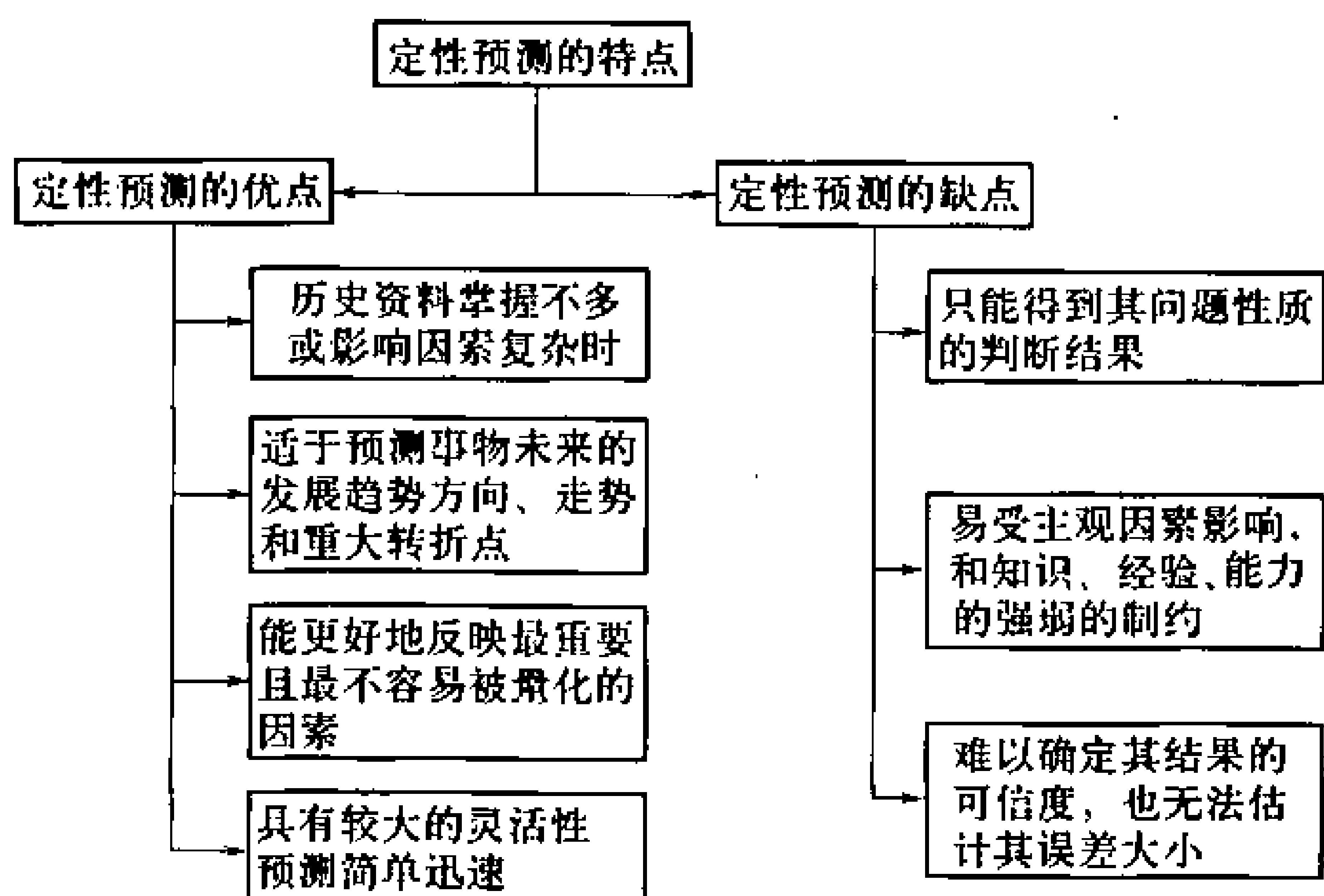


图 4.5 定性预测的特点

定性预测是应用最早的一种预测技术,它的作用十分重要。即使是在定量预测技术得到很大发展,出现了诸如时间序列分析、因果关系分析、概率统计及计量经济模型等大量的定量预测方法,电子计算机技术进入预测领域的今天,定性预测技术仍有其不可忽视的重要作用,不失为实用而又科学的预测方法。

定性预测方法很多,本节将重点介绍主观概率法、德尔菲专家调查法、交叉概率法和领先指标法等较常用的方法[2,4,5]。

4.3.1 主观概率法

主观概率是人们凭经验或预感而估算出来的概率。它与客观概率不同,客观概率是根据事件发展的客观性统计出来的一种概率。在很多情况下,人们没有办法计算事情发生的客观概率,因而只能用主观概率来描述事件发生的概率。主观概率法是一种适用性很强的统计预测方法,可以用于人类活动的各个领域。

主观概率是指根据发展趋势,由分析者的主观判断而确定的事件的可能性的大小,反映个人对某件事的信念程度。所以主观概率是对经验结果所做主观判断的度量,即可能性大小的确定,也是个人信念的度量。主观概率必须符合概率论的基本定理:

(1) 所确定的概率必须大于或等于 0,而小于或等于 1;

(2) 经验判断所需全部事件中各个事件概率之和必须等于 1。

用主观概率法有如下的步骤:

(1) 准备相关资料。

(2) 编制主观概率调查表,根据预测对象的性质特点,将预测对象分为不同的等级,预测者根据等级划分对预测对象进行评价,给出相应预测结果和可能发生的概率。

(3) 汇总整理，统计计算每位预测者的期望值，采用数学模型对所有预测者的期望值进行综合分析，得到最终的预测结果。

(4) 判断预测。

[例4.3] 某部队根据购买装备数量的历史和现状，提出某年购买装备数量的估计值和概率，见表4.2。

表4.2 主观概率法表(单位：台)

人员	估计值						期望值
	最高值	概率	中等值	概率	最低值	概率	
1	15	0.3	13	0.5	10	0.2	13
2	14	0.2	12	0.6	9	0.2	11.8
3	16	0.2	13	0.6	10	0.2	13
4	18	0.1	16	0.7	12	0.2	15.4
5	16	0.2	15	0.6	11	0.2	14.4

期望值的计算方法为：最高估计值×概率+中等估计值×概率+最低估计值×概率

如1号分析人员的期望值为

$$15\times0.3+13\times0.5+10\times0.2=13(\text{台})$$

先用算术平均法求出平均值为

$$\frac{(13+11.8+13+15.4+14.4)}{5}=13.52(\text{台})$$

然后再用加权平均法求出加权平均值作为调整的方案。考虑到各位分析人员的地位、作用和权威性的不同，分别给予1号和2号人员较大权数是3，3号和4号的权数是2，5号是1。则综合预测值为

$$\frac{(13\times3+11.8\times3+13\times2+15.4\times2+14.4\times1)}{3+3+2+2+1}=13.23(\text{台})$$

4.3.2 德尔菲法

德尔菲这一名称起源于古希腊有关太阳神阿波罗的神话。1946年，兰德公司首次用这种方法用来进行预测，后来该方法被迅速广泛采用。

1. 德尔菲法的步骤

德尔菲法依据系统的程序，采用匿名发表意见的方式，即专家之间不得互相讨论，不发生横向联系，只能与调查人员发生关系，通过多轮次调查专家对问卷所提问题的看法，经过反复征询、归纳、修改，最后汇总成专家基本一致的看法，作为预测的结果。这种方法具有广泛的代表性，较为可靠。德尔菲法步骤如图4.6所示。

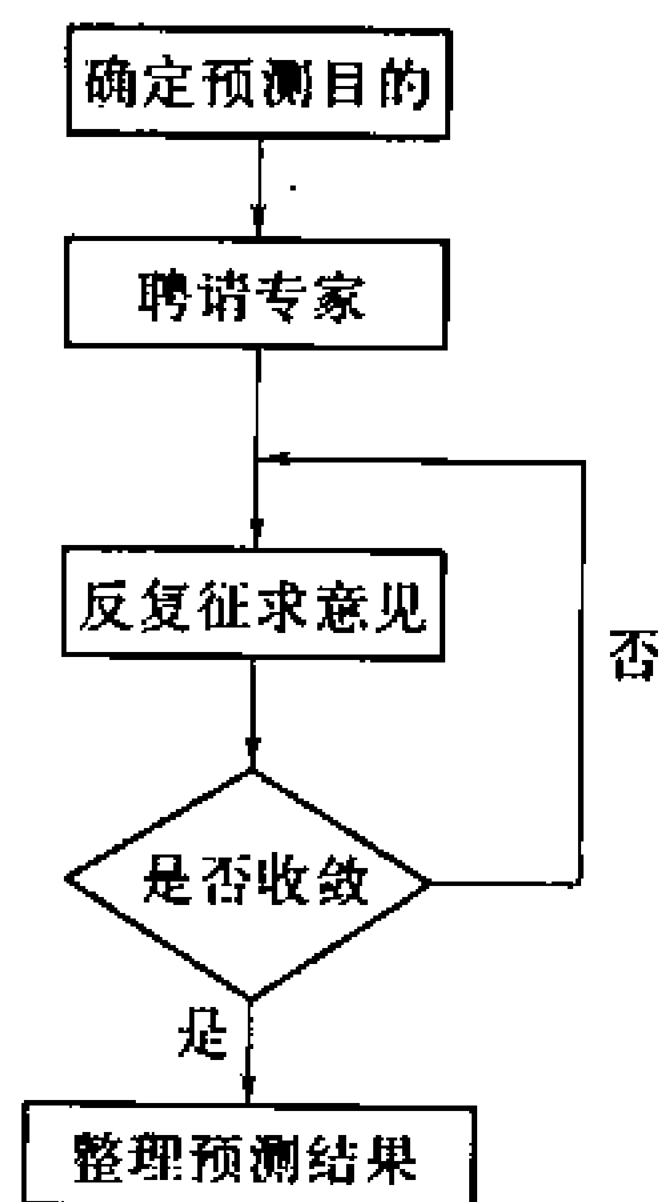


图 4.6　德尔菲法的步骤

(1) 确定调查预测目标。调查的组织者要明确调查的目标，设计调查问卷或调查提纲，并收集整理有关调查问题的背景材料，做好调查前的准备工作。

(2) 选聘专家。根据调查主题的需要，事先挑选一些专家，并征得他们同意，然后正式确定聘请专家名单，人数一般为 10 人～50 人。如果是重大预测项目，可以超过此数。有的多达数百人，不过人数过多，使调查工作难以组织，最后意见也不易集中。专家名单确定后，即可将调查问卷或调查提纲及背景材料提交给每个选定的专家，请专家用书面方式，在规定的时间内（一般定在收到调查问卷后的两个星期内）各自作答，寄回调查的组织者，组织者与专家建立直接的函询联系关系。

(3) 反复征询专家意见。在第一轮调查意见回收后，调查的组织者以匿名的方式将各种不同意见进行综合、分类和整理，然后分发给各位专家，再次征询意见。各位专家在第二轮征询过程中，可以坚持自己第一次征询的意见，也可以参考其他专家的不同意见，修改、补充自己原来的意见，再次寄回给调查的组织者。如此几经反馈，一般在 3 轮～5 轮后，各位专家的意见即渐趋一致，结束问卷调查。

(4) 整理预测结果。在征询结束后，必须对最后一轮征询意见进行整理和评价，将取得一致意见的事件写成一份公认的预测报告（包括未来事件的名称、实现时间、数量及概率等）。对预测结果处理，常用中位数法和主观概率法。德尔菲法的优缺点见表 4.3。

表 4.3　德尔菲法的优缺点

	德尔菲法
优点	能充分发挥各位专家的作用，集思广益，准确性高
	能把各位专家意见的分歧点表达出来，取各家之长，避各家之短

（续）

	德尔菲法
缺点	权威人士的意见影响他人的意见
	由于缺乏调查主题的背景材料，或背景材料不充分，有的专家难以给出正确的答案
	由于被调查专家之间是“背靠背”的，缺乏直接的交流，有的专家在获得调查组织者所汇总的反馈资料后，不了解别的专家所提供预测资料的根据
	过程比较复杂，花费时间较长

2. 预测结果的处理

预测结果的处理，通常采用中位数法。

中位数法是将专家预测结果从小到大依次排列，然后把数列二等分，则中分点值称为中位数，表示预测结果的分布中心，即预测的较可能值。为了反映专家意见的离散程度，可以在中位数法前后二等分中各自再进行二等分，先于中位数的中分点值称为下四分位数，后于中位数的中分点值称为上四分位数。用上下四分位数之间的区间来表示专家意见的离散程度，也可称为预测区间。

先介绍求中位数的方法。首先将几位专家的所提供的答案（包括重复的）从小到大排序：$x_1 \leqslant x_2 \leqslant x_3 \leqslant \cdots \leqslant x_n$。

中位数的计算式：

$$\bar{x} = \begin{cases} x_{k+1}, n = 2k+1(\text{奇数}) \\ \dfrac{x_k + x_{k+1}}{2}, n = 2k(\text{偶数}) \end{cases} \tag{4.1}$$

式中：$\bar{x}$—— 中位数；x_k—— 第 k 个数据；k—— 正整数。

再介绍上、下四分位点的方法。上四分位的计算公式为

$$x_{\text{上四}} = \begin{cases} x_{\frac{3k+3}{2}}, & n = 2k+1, k\text{ 为奇数} \\ \dfrac{x_{\frac{3}{2}k+1} + x_{\frac{3}{2}k+2}}{2}, & n = 2k+1, k\text{ 为偶数} \\ x_{\frac{3k+1}{2}}, & n = 2k+1, k\text{ 为奇数} \\ \dfrac{x_{\frac{3}{2}k} + x_{\frac{3}{2}k+1}}{2}, & n = 2k, k\text{ 为偶数} \end{cases} \tag{4.2}$$

下四分位点的计算式为

$$x_{\text{下四}} = \begin{cases} x_{\frac{k+1}{2}}, & n = 2k+1, k\text{ 为奇数} \\ \dfrac{x_{\frac{1}{2}k} + x_{\frac{1}{2}k+2}}{2}, & n = 2k+1, k\text{ 为偶数} \\ x_{\frac{k+1}{2}}, & n = 2k+1, k\text{ 为奇数} \\ \dfrac{x_{\frac{1}{2}k} + x_{\frac{1}{2}k+1}}{2}, & n = 2k, k\text{ 为偶数} \end{cases} \tag{4.3}$$

[例 4.4]　由 11 位专家对某武器装备需求数量进行估计，其估计数量(单位为件)按顺序排列如下：

90,91,91,92,93,93,93,94,94,95,96。

计算中位数，根据式(4.1)其中位数为 $\bar{x} = x_6 = 93$(件)

计算上、下四分位点，先计算上四分位点：

由式(4.2)、式(4.3)$x_{上四} = x_9 = 94$(件)

下四分位点为 $x_{下四} = x_3 = 91$ (件)

4.3.3　交叉影响法

交叉影响法，也即交叉概率法，是美国于 20 世纪 60 年代，在德尔菲法和主观概率法基础上发展起来的一种新的预测方法。这种方法是主观估计每种新事物在未来出现的概率，以及新事物之间相互影响的概率，对事物发展前景进行预测的方法。

交叉概率法用于确定一系列事件 $E_i(i = 1,2,3,\cdots,n)$ 之间的相互关系。若其中的一个事件 $E_m(1 \leqslant m \leqslant n)$ 发生，即发生概率为 1 时，这一事件对其余事件的影响，也就是其他事件发生概率的变化，其中包括有无影响、正影响还是负影响以及影响的程度。

交叉影响法就是研究一系列事件 $E_i(i = 1,2,3,\cdots,n)$ 及其概率 $p_j(j = 1,2,3,\cdots,n)$ 之间相互关系的方法，其方法步骤下：

(1) 确定各事件的影响关系；

(2) 专家调查，评定影响程度；

(3) 计算某事件发生时对其他事件发生概率的影响；

(4) 确定修正后的概率。

[例 4.5]　现以美国能源评价预测分析来说明交叉概率法的使用。经简化，影响美国能源政策因素的有：

E_1：用煤炭代替石油，其概率 $p_1 = 0.3$

E_2：为降低国内石油价格，其概率 $p_2 = 0.4$

E_3：为控制空气、水源的质量标准，其概率 $p_3 = 0.4$

这些因素之间的关系见表 4.4。

表 4.4　相互影响矩阵表

事　件	事件发生概率	对其他事件的影响		
		E_1	E_2	E_3
E_T	0.3	—	↑	↑
E_2	0.4	↓	—	—
E_3	0.3	↓	↓	—

表4.4中向上的箭头表示正方向的交叉影响，说明该事件的发生将增大另一事件发生的概率；而箭头向下，则表明负的影响，说明该事件发生将抑制或消除另一事件发生的概率；“一”号表示两事件无明显关系或相互间没有影响。

根据表4.4列出的矩阵，可求出其中各因素相互影响程度数值，用以修正发生概率，做出预测。

E_i 事件发生后，其余事件 E_j 发生的概率可按下式调整：

$$p'_j = p_j + ks(1 - p_j)$$

式中 p_j ——E_i 事件发生前，t 时间，事件 E_i 发生的概率；

p'_j——事件 E_i 发生后，t 时间，事件 E_i 发生的概率；

k ——E_i 事件发生对 E_j 影响方向的参数，若 E_i 发生对 E_j 的影响为正，则取 $k=1$；若 E_i 发生对 E_j 的影响为负，则取 $k=-1$；若无影响，则 $k=0$；

s ——E_i 事件发生对 E_j 影响程度，$0<s<1$，随着影响程度由小到大，s 取值由0到1逐渐加大。

E_i 事件发生后，事件 E_j 发生概率的调整如图4.7所示。

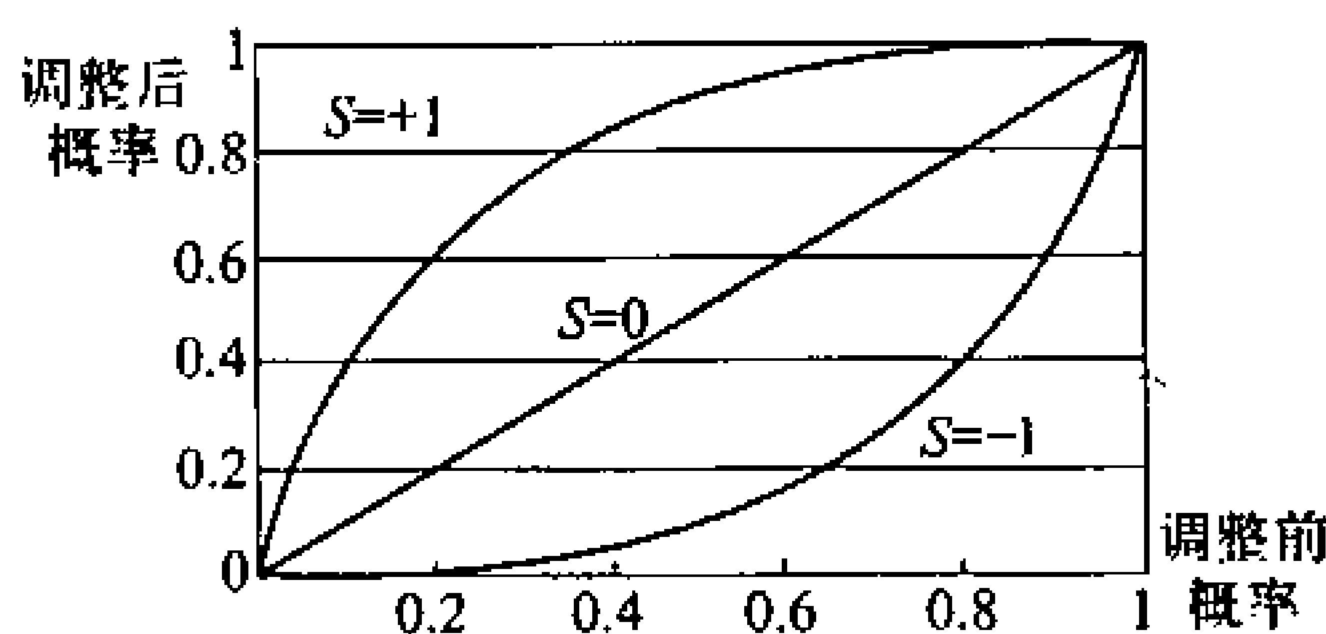


图4.7 概率调整图

事件 E_i 发生后对其余事件的影响程度一般可用专家会议或专家调查法加以确定。

4.3.4 领先指标分析法

领先指标又称超前指标、先兆指标。相对于领先指标，则是同步指标或称一致指标。相对于同步指标，则是滞后指标或称后滞指标。将指标归类为领先指标、同步指标和滞后指标，是以某一指标的时间序列为标准的，该时间序列称为原始指标时间序列。运用时间序列的分解法，在原始时间序列中剔除长期趋势、季节变动、偶然变动后，显示出原始时间序列的周期性循环变动。同理，也可以找出与原始指标密切关联的其他指标的周期性循环变动。容易发现有些指标的时间序列循环变动周期提前于原始指标时间序列；有些同于原始指标时间序列；有些落后于原始指标时间序列。只要变动周期基本相同，那么上述指标就可分别定义为原始指标的领先指标、同步指标和滞后指标。

利用领先指标分析法进行预测的步骤如下：

（1）分析预测目标与其他指标的关系，找出领先指标、同步指标、滞后指标。例如，可以把钢材、燃料价格变动变为机械产品价格变动的领先指标。

（2）画出领先指标、同步指标及滞后指标的时间序列数据图形（图4.8）。

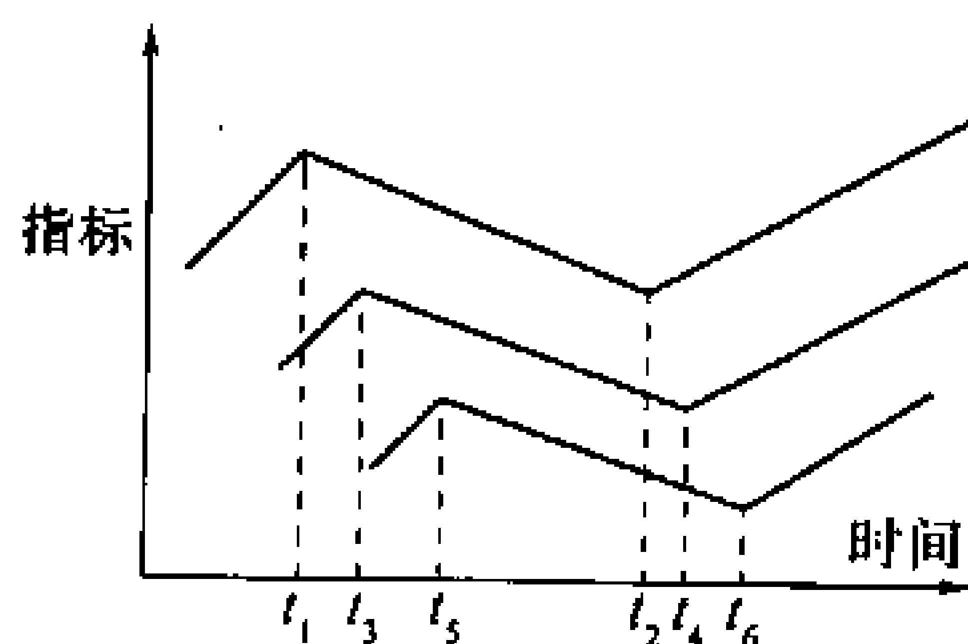


图4.8　时间序列数据图形

t_1 —领先指标出现最高点的时间；t_2 —领先指标出现最低点的时间；

t_3 —同步指标出现最高点的时间；t_4 —同步指标出现最低点的时间；

t_5 —滞后指标出现最高点的时间；t_6 —滞后指标出现最低点的时间；$T = t_1 - t_3$ 称为领先时间。

（3）进行预测。找到领先时间 T 以后，若要求时刻 t 的预测值，只要求出 $t - T$ 时刻领先指标的实际值，即可得到欲求的预测值。

4.4　定量预测方法

定量预测是使用一历史数据或因素变量来预测需求的数学模型。根据已掌握的比较完备的历史统计数据，运用一定的数学方法进行科学的加工整理，借以揭示有关变量之间的规律性联系，用于预测和推测未来发展变化情况的一类预测方法。

进行定量预测，通常需要积累和掌握历史统计数据。如果把某种统计指标的数值，按时间先后顺序排列起来，以便于研究其发展变化的水平和速度。这种预测就是对时间序列进行加工整理和分析，利用数列所反映出来的客观变动过程、发展趋势和发展速度，进行外推和延伸，借以预测今后可能达到的水平。

定量预测基本上可分为两类：一类是时序预测法。它是以一个指标本身的历史数据的变化趋势，去寻找演变规律，作为预测的依据，即把未来作为过去历史的延伸。时序预测法包括平均平滑法、趋势外推法、季节变动预测法和马尔可夫时序预测法[2,4-6]。

另一种是因果分析法，它包括一元回归法、多元回归法和投入产出法。回归预测法是因果分析法中很重要的一种，它从一个指标与其他指标的历史和现实变化的相互关系中，探索它们之间的规律性联系，作为预测未来的依据。

4.4.1 平滑预测法

平滑预测法也称为趋势外推法，是一种简单而使用面很广的确定型时间序列预测技术，是研究预测对象自身时间过程演变规律及其未来趋势的一种方法。它根据过去的演变特征来预测未来，不考虑随机性。如果未来的演变规律能维持下去，平滑法就是一种简单有效的预测手段，应用效果也不错。由于未来不可能是过去和现在的简单重复，故平滑法在应用时有一定的局限性，用于短期预测时较准，但在遇到趋势变化较大、出现转折时，就不能简单地用平滑法进行预测。平滑法可分为两种：移动平均预测法、指数法。这里只研究移动平均预测法。

采用此种方法的目的在于寻求统计数据的规律性及变量随时间变化的趋势。历史统计数据虽然真实地反映了数据的历史演变情况，但可能波动起伏较大，特别当点数很多时，往往很难从自然分布直接看出其规律性。常用的算术平均法反映不出最大值和最小值，也看不出发展过程和演变趋势。

1. 一次移动平均法

一次移动平均方法是收集一组观察值，计算这组观察值的均值，利用这一均值作为下一期的预测值。

其计算公式为

$$\hat{y}_{t+1} = M_t = \frac{y_t + y_{t-1} + \cdots y_{t-N+1}}{N}$$

式中 M_t —— 第 t 期移动平均值；

$\hat{y}_{t+1}$ —— 第 $t+1$ 个周期的预测值；

y_t —— 第 t 个周期的原始数据；

N —— 每分段数据的个数。

当 $N=1$ 时，没有取平均值，这就是原始数据本身；当 $N=t$ 时，全部数据取算术平均数。如何合理地选取 N 呢？通常应遵循的原则有如下两点：

(1) 要根据原始数据的多少，既要分段，又要取平均数。如果数据点多，则选取的 N 大一些；如果数据点少，选取的 N 小一些。

(2) 要考虑预测对新数据适应的灵敏度要求。若灵敏度要求高，N 就选取小一些；若平稳性要求高，N 就选取大一些。但 N 过大，容易把偶然因素误为趋势，导致判断失误；N 过小，容易对变化缺乏适应性。因此，在 N 值的选择上经验很重要，也可取几个 N 值，进行多方案比较分析，以做出正确选择。

2. 加权移动平均法

加权移动平均法克服了简单移动平均法中的不足之处：每期数据在预测中的重要程度都是等同的。实际上，每期数据包含的信息量并不一样，我们可以考虑各期数据的重要性，对近期数据给予更大的权重，然后求每个数据与对应权数之积，

再求平均值，以加权平均值作为预测期的预测值。其计算公式为

$$\hat{y}_{t+1} = M_t = \frac{w_1 y_t + w_2 y_{t-1} + \cdots w_n y_{t-N+1}}{w_1 + w_2 + \cdots w_n}$$

式中 $w_1, w_2, \cdots, w_n$ —— $y_t, y_{t-1}, \cdots, y_{t-N+1}$ 的权重；

$\hat{y}_{t+1}$ —— 第 $t+1$ 个周期的预测值。

该方法较之一次移动平均值法灵活，更能反映实际情况和发展趋势。

[例4.6] 以某部队每月装备维修费用为例，用以上两种方法预测下一个月的装备维修费用，见表4.5。

表4.5 一次移动平均法和加权移动平均法预测

时间/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
维修费用/万元	10	12	13	15	17	16	20	24	22	23	
一次移动平均法($N=3$)				11.7	13.3	15	16	17.7	20	22	23
一次移动平均法($N=4$)					12.5	14.3	15.3	17	19.3	20.5	22.3
加权移动平均法					11.7	13.4	14.6	16.4	18.1	19.1	21.9
注：加权移动平均法中 $N=4, a_0=1.5, a_1=1, a_2=0.5, a_3=0.5$											

4.4.2 回归分析预测法

回归分析预测法，是在分析自变量和因变量之间相互关系的基础上，建立变量之间的回归方程，并将回归方程作为预测模型，根据自变量在预测期的数量变化来预测因变量。

回归分析预测法的步骤：

(1) 根据预测目标，确定自变量和因变量。明确预测的具体目标，也就确定了因变量。如预测具体目标是下一年度的销售量，那么销售量 Y 就是因变量。通过市场调查和查阅资料，寻找与预测目标的相关影响因素，即自变量，并从中选出主要的影响因素。

(2) 建立回归预测模型。依据自变量和因变量的历史统计资料进行计算，在此基础上建立回归分析方程，即回归分析预测模型。

(3) 进行相关分析。回归分析是对具有因果关系的影响因素（自变量）和预测对象（因变量）所进行的数理统计分析处理。只有当自变量与因变量确实存在某种关系时，建立的回归方程才有意义。因此，作为自变量的因素与作为因变量的预测对象是否有关，相关程度如何，以及判断这种相关程度的把握性多大，就成为进行回归分析必须要解决的问题。进行相关分析，一般要求出相关系数，以相关系数的大小来判断自变量和因变量的相关的程度。

(4) 检验回归预测模型，计算预测误差。回归预测模型是否可用于实际预测，

取决于对回归预测模型的检验和对预测误差的计算。回归方程只有通过各种检验,且预测误差较小,才能将回归方程作为预测模型进行预测。

(5) 计算并确定预测值。利用回归预测模型计算预测值,并对预测值进行综合分析,确定最后的预测值。

下面,以一元回归分析为例,说明回归分析方法。

设预测对象为因变量 y,相关因素为自变量 x,已知收集到预测对象的 n 对历史数据为

$$(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)$$

建立回归方程,一元线性回归方程的基本形式为

$$\hat{y}_i = a + bx_i$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i$$

式中 e_i——实际值与预测值的误差。

[例 4.7] 为了预测部队装备维修经费与装备数量之间的关系,随机抽取了10个部队的样本,得到的数据见表4.6。

表 4.6 部队维修经费与装备数量

编 号	装备数量/万件	维修费用/万元
1	0.2	5.5
2	0.6	6.5
3	0.8	12.0
4	1.0	10.0
5	1.2	13.0
6	1.6	15.0
7	2	20.0
8	2.2	18.0
9	2.4	21.0
10	2.8	28.0

对数据进行回归分析并预测拥有1.5万件装备的部队一年的装备维修经费。

首先,录入数据。然后,在直方图上(直角坐标系下),作出散点图,如图4.9所示。

其次,观察散点图,判断点列分布是否具有线性趋势。只有当数据具有线性分布特征时,才能采用线性回归分析方法。从图中可以看出,本例数据具有线性分布趋势,可以进行线性回归。

最后得到自变量与因变量的线性关系式为

$$\hat{y}_i = 3.18 + 7.92x_i$$

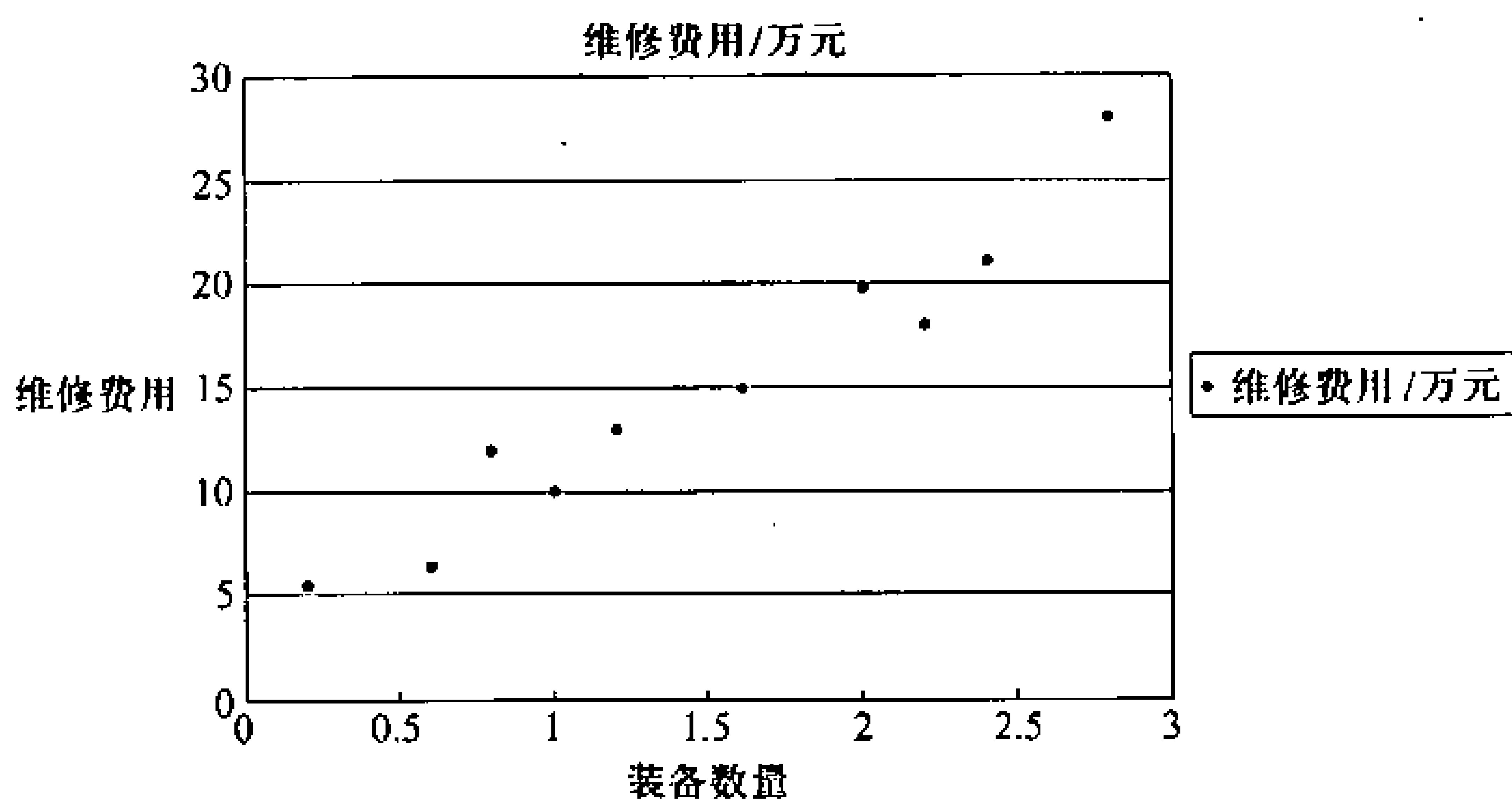


图 4.9　原始数据的散点图

考虑某部队拥有 1.5 万件装备时，令 $x_0 = 1.5$，一年的装备维修经费预计为

$$\hat{y}_0 = 3.18 + 7.92 \times 1.5 = 15.06$$

参考文献

[1] 薛华君. 系统工程与运筹学[M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2007.

[2] 刘兆世. 航天与系统工程[M]. 北京：中国宇航出版社，2006.

[3] 胡保生，彭勤科. 系统工程原理与应用[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[4] 马脊海. 扁鹊治病[N]. 讽刺与幽默，2006-1-13(12).

[5] 暴奉贤，韩兆洲，郭海华. 市场调研与预测方法[M]. 广州：暨南大学出版社，2001.

[6] 胡旭呈. 市场预测方法百种[M]. 北京：首都经济贸易大学出版社，2000.

[7] 浦再明. 网络法基本原理及其应用[M]. 北京：金盾出版社，1985.

[8] 任立丽. 图示评审技术 GERT 在主机板研发项目中的应用[D]. 上海：上海交通大学，2007.

[9] 聂规划，张思敏，陈东林. 基于 GERT 的物流园区建设风险评价模型[J]. 当代经济，2009，1：157-159.

[10] 徐哲，吴瑾瑾，姚李刚. 基于 GERT 仿真的武器装备技术风险量化评估模型[J]. 系统仿真学报，2009，20(7)：1665-1660.

[11] 魏刚，陈浩光. 武器装备采办制度概论[M]. 北京：国防工业出版社，2005.

[12] 陈庆华，郭全魁，宋华文. 装备运筹学教程[M]. 北京：国防工业出版社，2007.

[13] 杜玠，陈庆华. 系统工程方法论[M]. 长沙：国防科技大学出版社，1992.

[14] 李霖. 军事装备学概论[M]. 北京：装备指挥技术学院，2001.

[15] 喻湘存，熊曙初. 系统工程教程[M]. 北京：北京交通大学出版社，2006.

[16] 周德群，等. 系统工程概述[M]. 北京：科学出版社，2005.

第5章　系统模型

建立系统模型,特别是建立数学模型,是系统工程和系统分析的重要手段。本章从四个例子入手,说明采用适当的模型,可以更简捷地分析问题,进而对数学模型的特点与分类,以及模型化过程进行了阐述。

5.1　实　例

首先看四个例子。

[**例5.1**]　"病态平衡"模型理论

2004年春天的一个晚上,一位80岁的老爷爷推着一辆破旧的自行车到COF医院探望他的老伴。医院的护士看着他颤抖的样子,建议这位老爷爷,闲着也是闲着,为何不顺便去检查一下身体。老爷爷坚决不肯,并说:"10多年前医生给我检查过了,说我多个器官不正常,要我住院,可能还要动手术,现在过了10多年了,也没有发现有很大的变化。"护士问老爷爷既然有毛病为什么不住院做手术呢?这位老爷爷指着破旧的自行车说:"我的身体就像这辆自行车,除了铃铛不响,其他地方都响,如果说有毛病,每个零件都有毛病,但是一个零件也不能更换,弯刀对着瓢切菜,单独更换一个零件只能使这辆破自行车坏得更快。"

"弯刀对着瓢切菜",换句话说就是"病态平衡"模型理论。

这样的例子还可以举出许多例子。例如在改革开放初期,一批国营企业改制,安置国营企业的职工的相关政策、措施尚未建立健全起来,一些下岗职工为了生计,做起了"小买卖",其中有的"小买卖"就存在偷税漏税的现象。下岗职工依靠着这些"小买卖",维持着全家的生计,社会秩序也是呈现出某种"平衡"。政府可以充分利用这种"平衡"的秩序,尽快地完善相关的政策,落实各种措施,然后规范税收制度。如果在其他相应政策、措施还没有形成之前,就去单方面的去强化税收政策,就有可能造成社会秩序的"不平衡"。

再比如,根据有关部门的统计,尽管有关部门的车辆外出"申请批准登记"制度建立得很完善,但仍然存在着私出车、出私车的现象,即没有履行"申请批准登记"手续就出车了,甚至私自出车办私事,而且统计得知,多数交通事故都是私出车、出私车的人员造成的。道理很简单,因为没有履行手续,驾驶员心情紧张,开车速度快,尽可能躲避人们的视线,各种违章就随之而来。一旦出现个别违章现象,

或者上级要求特殊时间段的严格管理，管理者立即想到的就是从严整顿，结果事与愿违，越严越出事的现象有一定的规律性。管理者应该想到，除了严格执行履行出车手续外，还应该有应对"私出车、出私车"现象的补救办法。违规者由于怕出大事，就会出更大的事。

要知道，无论是多么严格的制度，总还会有一些特殊情况需要处理，需要应对。比如医院规定探视病人的来访者最迟必须在夜间11点前离开病房，到时关门上锁，谁都打不开。这种规定实施起来，必然会出现来访者在医院留宿的个别现象。如果医院又有严禁医院来访者留宿的规定，就必然经常出现两难的事情。与其如此，不如在夜间11点后另外开辟一个通道，需要绕行很长时间才能走出病房，让违规者有自己改正错误的机会，当然需要违规者付出很大的代价。

再比如，在当前特殊的经济形势下，就业压力很大，全国政协常委厉以宁提出"应该给城市小摊贩留条路"，以便解决就业压力，把解决底层百姓的生存权放在至关重要的位置。从城管部门来说，改变多头执行的局面，由城管机构集中行使处罚权，这个制度的初衷是不错的。但是实施起来，在城市流动人员不断增加，就业渠道狭窄的情况下，城管执法的目的是要创造一个整洁有序的城市环境，维护"在籍"城市居民的利益，这不仅形成了城管和摊贩之间的矛盾，而且引起人们，包括外来人员和"在籍"城市居民对城管的负面评价。厉以宁先生认为城管追摊贩导致了社会不稳定，确实是敏锐和诚恳的。可喜的是，有的地方政府已经认识到了这一点，《北京青年报》2009年6月24日，A13版报道，广西自治区政府规定，城管执法时，不得扣押小贩商品。

当大批农民工进城以后，农民工子女的义务教育问题突出起来，当城市教育部门无力也无暇顾及时，一些"农民工子女小学"出现了。城市有关管理部门可以有很多理由强行取缔、遣散这些"农民工子弟学校"，那么这些农民工子女的义务教育又如何落实呢？不如首先默认它们存在的"合理性"，进而由城市有关部门出资兴建能安排农民工子女入学的"过渡小学"，然后逐渐纳入城市的义务教育体系不是更好吗？

由"病态平衡"过渡到"理想状态的平衡"，实际上是要使多个目标都要达到最优的过程，也是一个永不完结的过程，对其中一个目标来说，可能接近了理想状态，但从其他目标来说，可能离理想状态还比较遥远。

人们追究的是一种"理想状态"，但是"理想状态"常常只是人们的一个愿望，在一定时期内，一定的环境条件下；承认或维持一定的"病态平衡"，或许是逐渐逼近"理想状态"的一种可行途径，也不失为一种解决办法。

有人问作者，"理想状态的平衡"与"病态平衡"之间的关系，是不是就像"健康"与"亚健康"之间的关系？作者认为，"亚健康"不是"健康"，而"病态平衡"是一种"平衡"。

［例 5.2］ 水盆里的水为什么会旋转呢

本书作者在读大学三年级的时候，理论力学老师讲授由于地球自转的影响，放在地面上的一个静止的水盆，拔掉盆底下的小孔木塞，一会儿就会随着水的流下，水在盆中发生旋转，而且是顺时针方向的。作者在想，如何用最简单的模型解释这种现象呢？

不必要用复杂的数学表达式去建立地球自转的加速度模型，只要设想有一个水盆，盆底下有一个小孔，先是用木塞子塞着。设想把这个水盆端到了地球的北极点上，如图 5.1 所示。现在来考查水盆壁上的一个小水滴的情况，开始时，水盆中的水相对水盆是静止的，一起跟着地球做逆时针旋转。后来拔掉了木塞子，水便通过小孔流出来了。这时水盆周围壁附近的一个小水滴由于受到下流水的影响，就像被一根小细绳栓住一样向着水盆中心运动。这时水不再是静止的了。由于盆壁做逆时针旋转，盆壁附近的小水滴相对盆壁来说，具有了顺时针方向旋转的趋势。随着小水滴离开盆底中心小孔的距离越来越小，旋转的角速度也就越来越快。这样一来，盆中水顺时针旋转现象就越来越明显了。

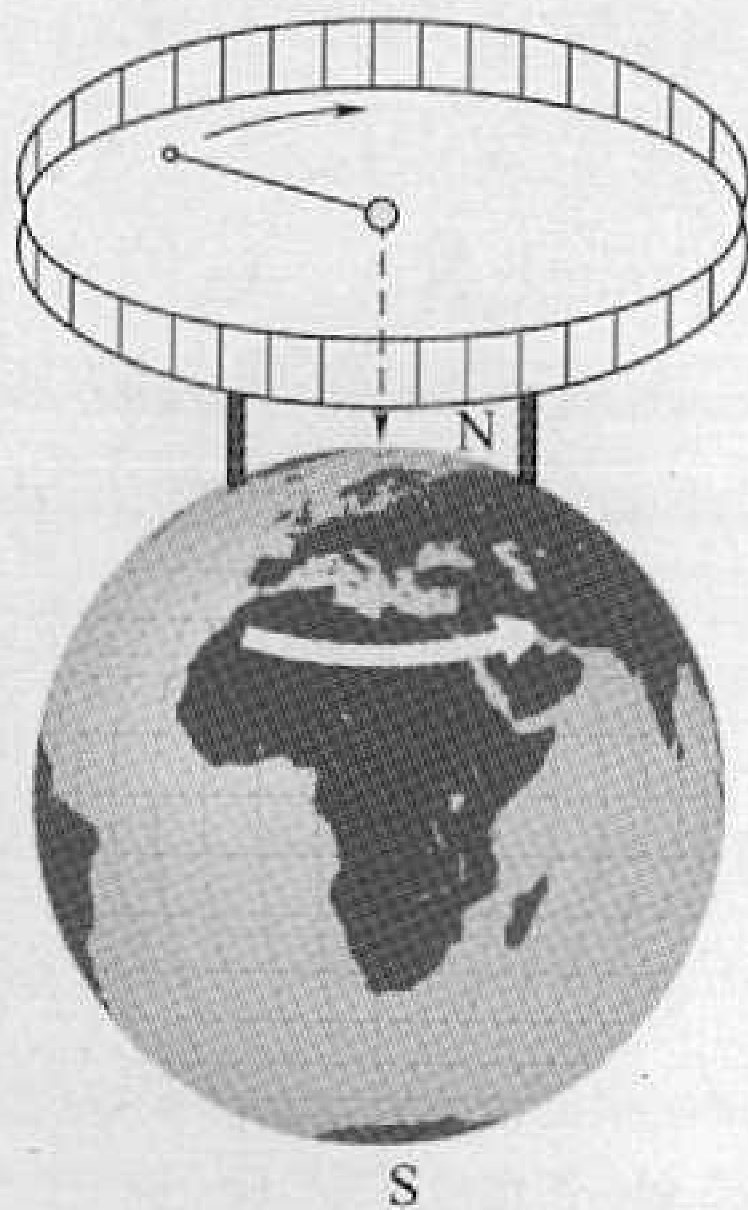


图 5.1 水盆放在北极点上

如果把水盆放到南极点上，水旋转的方向就变成逆时针了，而在赤道上就不会旋转了。

［例 5.3］ 三人结构的稳态现象

1984 年的年底，湖南省科协系统工程咨询管理办公室，组织咨询专家到湘东一个国营瓷器厂开展咨询论证工作。该厂最近一段时间产品质量出现一定的问题，调查发现主要是管理不到位，管理干部的业务素质不高，反映出管理干部的选用上有任人唯亲的现象。有的职工反映，总经理是武大郎开店——高个子的不用，总经理素质不高，作为中层管理干部的车间主任也素质不高，最有能耐的业务尖子和管理人才都没有用起来，放在班组里闲置着。为什么会出现这种情况呢？可以建立一个三位数组模型，加以说明。

假如说，用 A、B、C 分别表示综合素质很高、综合素质较高、综合素质一般的管理者，用三维数组(—,—,—)表示管理干部的层次结构，其中第一个分量表示总经理位置，第二个分量表示车间主任的位置，第三个分量表示基层班组的位置。

三种素质的人填充三个层次的岗位，无论是公开竞争，还是上级指定，或是阴差阳错，瞬时的结果共有六种组合方式：

(A,B,C)，(B,C,A)，(C,B,A)；

(B,A,C)，(A,C,B)，(C,A,B)。

称这样的一个“三人结构”是稳态的，是指其中没有两个人能够达成改变现状的共识，或者存在两个人能够达成保持现状的共识。反之，则称为非稳态的。

第一种情况是稳态的，高效的，理想的。

第二种情况虽然不是高效的，但是稳态的，因为 B、C 可以结成巩固的同盟，在把 A 放在基层班组方面具有共同的目标，如果上级组织部门不到企业调研，或者走马观花式地，只在中上层管理干部中调研，听到的是一片赞扬声。

第三种情况是最不高效的，但却是稳态的，死水一潭的，其中没有两个人能达成共识，但是 C 可能去拉拢 B，提醒 B 要时刻提防 A，C 还可能告诉 B，要注意 A 正在做取代 B 的车间主任的位子；如果上级组织部门不深入基层调研，一般情况下，上级也听不到这个企业的不同声音。

第四种情况不是高效的，也不是稳态的，B 为了保住自己的地位，可能去拉拢 C，B 与 C 可能会结成同盟，B 与 C 共同努力，C 可能取代 A 担任车间主任，把 A 下放到班组；也有可能 A 在上级的支持下晋升为总经理，而 B 担任车间主任；也就是说，第四种情况不稳定，会向着第一、二种情况转化。

第五种情况不是高效的，也不是稳态的，因为经过一段时间的实践，总经理 A 可能会赏示 B 的能耐，很快会提拔 B 到车间主任的岗位，而把 C 下放到班组，转化为第一种情况。

第六种情况不是高效的，也不是稳态的，因为 A、B 很容易取得共识，分别高升一级，最后 C 被下放到班组；转化为第一种情况。

分析这三种稳态结构可以看出，对于一个国营企业的总经理人选，需要上级部门考核任命，只有把综合素质最好的管理者放到总经理的位置上，企业的管理队伍建设才能够顺利进行。

[**例 5.4**]　爱因斯坦给出的智力测试题

2007 年 7 月 5 日，本书作者翻阅《北京青年报》，发现在当天的 D2 版上，刊登了据说是爱因斯坦给出的智力测试题，问题的描述如下。

已知：

(1) 分别来自五个国家(英国、瑞典、丹麦、挪威、德国)的五个人；

(2) 分别住在五间不同颜色的房子里(红房子、绿房子、白房子、蓝房子、黄房子)；

(3) 分别饮用五种不同的饮料(茶、咖啡、牛奶、啤酒、矿泉水)；

(4) 分别喂养五种不同的宠物(狗、鸟、猫、马、鱼)；

(5) 分别抽五种不同的烟(PALL 烟、DUN 烟、混合烟、BLUE 烟、PRIN 烟)。

又知：

(1) 英国人住红房子，瑞典人养狗，丹麦人喝茶；

(2) 绿房子在白房子左边，绿房子的主人喝咖啡；

(3) 抽 PALL 烟的人养鸟，黄房子的主人抽 DUN 烟；

(4) 住中间那间房子人喝牛奶,挪威人住第一间房子,抽混合烟的人住在养猫人旁边;

(5) 养马的人住在抽 DUN 烟的人旁边,抽 BLUE 烟的人喝啤酒;

(6) 德国人抽 PRIN 烟,挪威人住在蓝房子旁边;

(7) 抽混合烟的人的邻居喝矿泉水。

请问,谁养鱼?

实际上是要你给出,每个人住在什么颜色的房子里,喝什么饮料,养什么宠物,抽什么烟。

《北京青年报》2007 年 7 月 5 日同一版上给出了"标准答案",丹麦人养鱼,见表 5.1。

表 5.1

挪威人	德国人	英国人	丹麦人	瑞典人
咖啡	矿泉水	牛奶	茶	啤酒
鸟	猫	马	鱼	狗
PALL 烟	PRIN 烟	混合烟	DUN 烟	BLUE 烟
绿房子	蓝房子	红房子	黄房子	白房子

本书作者认为,依据情景的描述,这个"标准答案"是不确切的。绿房子在白房子的左边,应该是"紧靠",不应该离得这样远。

这个"标准答案"也不是唯一的,因为将"猫"、"鱼"对调以下,仍然成立。

为此,本书作者采用"排列纸片"的方法,不到半小时就给出了答案,"排列纸片"法,也是一种求解问题的模型。

作者于当天上午,寄特快专递给《北京青年报》,指出"丹麦人养鱼"的答案不对,正确的答案应该是"德国人养鱼",这个答案是唯一的,见表 5.2。

表 5.2

挪威人	丹麦人	英国人	德国人	瑞典人
矿泉水	茶	牛奶	咖啡	啤酒
猫	马	鸟	鱼	狗
DUN 烟	混合烟	PALL 烟	PRIN 烟	BLUE 烟
黄房子	蓝房子	红房子	绿房子	白房子

5.2 系统模型的概念

模型在系统工程研究中具有极为重要的地位。因为系统工程所研究的对象不仅是有待建立的,而且是无样本的、信息不充分的,这就使得系统工程研究包含着

建立新的概念，对各种方案进行分析、评定、选择以及检验各种环境因素对系统的影响等极为复杂的问题。于是，就特别需要运用模型方法来表达和考察这些何题。只有这样才能对问题有更深入的认识，从而帮助启发思想和加速工程开发的进程。

使用模型作为研究手段已有很久的历史，但以往多着重于模型技术的讨论，如最早是使用原样模型，随后才发展了相似模型和数学模型。随着模型技术的不断发展，又形成和发展了模型方法论。在系统工程中，由于所处理的都是大规模的、复杂的工程系统，所以模型方法论更显得特别重要了。模型方法论研究模型的本质、概念、类型以及模型在工程开发中的地位。或者说，模型方法论是研究指导运用模型的基本概念和原则。

从系统概念来看，模型是关系的各种表达形式。因此，建立系统的模型需要从过程和状态两个方面去寻求各元素之间的关系。从认识论来看，模型化过程如图 5.2 所示。

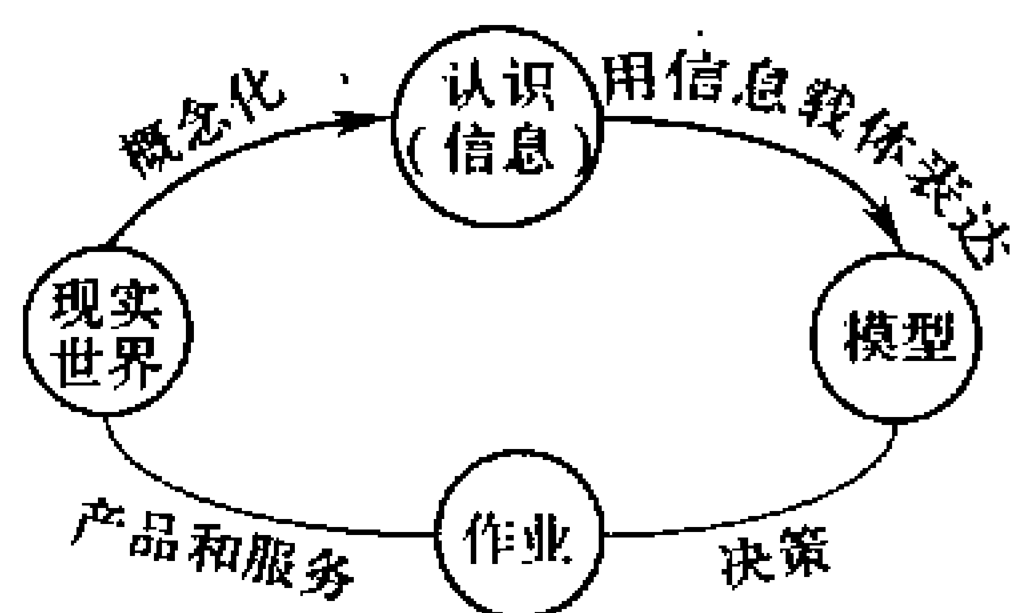


图 5.2　模型化过程

人们从对现实世界的观察中获得概念，形成认识，再将这种认识用某种信息载体表达出来，就是模型。模型被确定为行动方案之后，以产品和服务加入现实世界。这里值得注意的一点是，依据从信息可以加工出信息的观点，在模型和认识之间有着密切的反馈，这就是“用模型研究问题”的现实活动。据此，可以把模型理解为概念集合（信息）的表达系统，也可以更深入一步说，模型是思维形式的外在表现。

5.3　系统模型的分类

弄清楚模型的本质以后，可以将模型进行以下的分类。

1. 原样模型

原样模型是工程开发末期建立起来的一种实体。例如，在制造汽车、电机、飞机等庞大的产品时，往往转入批量生产以前要先造样机，这就是原样模型。对于以信息为元素的抽象系统，也有取样模型。例如，一部书的原稿、一份研究报告的草稿等也属于原样模型。然而，并不是所有的系统都能拿出原样模型，例如，一些超大型的水利工程，由于受客观现实条件的限制，就不可能做出其原样模型。

2. 相似模型

相似模型是根据不同系统之间的相似规律而建立起来的研究用的模型。这些相似规律包括几何的、逻辑的、过程的相似，等等。例如，地球仪和日月蚀演示仪、木材和塑料制成的飞机风洞实验模型，以及确定零部件空间布局的装配模型等都是相似摸型。又如，水坝的受力状态可以通过电模型来模拟，而其渗水问题则可通

过热装置来模拟。在导弹狭小仪器舱内有时要装入上百个仪器，如果用计算和绘图的方法则是无法解决的，必须把要装入的仪器的实体模型进行现场试装，才能有效地确定，因为不只是空间是否放得下的问题，还要解决安装顺序、测试时操作、维修的方便以及相互干扰等一系列更复杂的问题。当然，小的水电工程（如葛洲坝）可以当作大的水电工程（如三峡大坝）的相似模型。

3. 图形模型

图形模型有非常丰富的内容，主要包括：

（1）图画，用于示形。

（2）草图，用于示意。

（3）框图，用于表示部分与部分之间或部分与整体之间的联系。

（4）工程图，显示物体的确定的结构和顺序关系，如各种建筑工程图、化工流程图等。

（5）逻辑图，显示可用布尔代数表达的关系。

（6）图论图，用于表示拓扑关系。

图论中所定义的图，又分为三种情况：

（1）无向图，记为 $G(V,E)$，给定了图的顶点集合，以及每两个顶点之间的边线集合。

（2）有向图，记为 $G(V,A)$，给定了图的顶点集合，以及每两个顶点之间的有向边线集合。

（3）赋权图，对于无向图中的边线、有向图中的有向边线，都赋予一个实数权值。

由于图论中的图与集合论、关系、拓扑、矩阵、代数方程等概念是紧密相联的，所以，这种图对于强调概念的宏观问题和强调定量化描述的微观工程问题，都有很强的表达能力。

图形模型的前3种图（图画、草图、框图）为不严格图，即没有严格确定的规范，作图者常常要附加文字说明。由于这种图内涵小，所以使用极为广泛，有时常常用来显示那些还不太清楚的问题，如描述效能原理、系统组态、宏观过程等。因此，对于系统工程人员来说特别常用。有人把系统开发的初始阶段比作绘制漫画，这是不无道理的。正是借助于这些图形模型来开发构造一个新系统的想象力和创造力，即逐步引出与之有关的问题和需要进一步探索的问题，使得所要开发的系统变得越来越清晰，越来越具体。

例如，氢弹开发过程中，一开始只是在纸上画出一些想象中的简单图画。然而，正是通过这些图画帮助说明了与之有关的各项工作、知识、问题以及所要求的数据，从而把这一工程一步一步地向前推进，使得能够制订出详细的工程设计，最后研制出实际可用的氢弹。任何一项开发性的工程，几乎毫无例外地都要经过这

样一个过程。

图形模型的后3种图(工程图、逻辑图、图论图)称为严格图,它们有严格确定的结构形式和规范。工程图是形象和参数相结合的图形,主要用于作业级的工程活动。逻辑图用于概念开发和系统逻辑关系的描述,在自动系统、计算机的设计有广泛的应用。图论图可以看作是关系的图形描述,由于它有相当强的表现能力,所以在描述概念、结构、算法等问题时几乎都要用到。例如,树形图是在描述关系发展中最常用的,网络图常常用来描述系统进一步的细致一些的关系结构,有向图则用来描述系统状态的转移以及各种流(如信息流、作业流、物流、能流等)。计划管理中常用的PERT(计划评审技术)图也是一种有向的赋权图。借助于图论图,还可以完成某些优化计算,如最短路径问题、工程周期问题、工作分派问题、力量匹配问题等。

4. **数学模型**

数学模型是指运用数学符号和数学公式来表达系统的结构或过程。在以往的工程技术中,常常把数学模型看作是最终模型,其含义有两个方面。第一,找到数学表达式才能做出实体,第二,建立起数学表达式才能优化、才能做出良好的工程设计。这种看法对于工程技术活动自然是现实。因此,在传统的工程技术中,常常把数学化与科学化的概念看作是等同的。

如果把这个概念扩大到以研究工程开发为目地的系统工程领域内,就不一定确切了。其根本原因就在于工程开发问题具有很大复杂性、模糊性、无样本性和信息的不充分性,从而使得我们不能做到使用传统工程中所使用的以量与量之间的关系为形式的经典数学工具来描述这一类问题。美国国防部负责武器系统开发的部长在报告中曾经深有感触地说:一个新的武器系统只有在概念上被充分研究并确定以后,工程的数学计算才能给出有价值有意义的东西。在发展一个新系统时,数学形式不是追求的目标,而只是具体化过程中的手段,请不要相信计算机,甚至高速计算机能算出一个工程开发的"最佳战略",我们只能依靠方法论和创造性。

然而,事情总是变化和发展的,一方面我们强调不要把传统的工程技术中的数学模型勉强往系统工程活动上生搬硬套,这无疑是正确的,而且是重要的。另一方面,近代数学的发展,为描述概念提供了有效的手段,虽然把它们和工程开发活动联系起来还仅仅是开始,但已经显示出具有重大意义的前景。

在传统的工程技术中,常常把数学模型分为确定型或随机型,或者分为静态的和动态的。在系统工程中还要分为近代数学模型和经典工程数学模型,前者主要用于开发和描述概念,后者主要用来描述各种子系统。

讨论模型的实质和形式,其目的在于开发应用模型的思想。当提到模型时,自然就不应再把模型的概念限制在经典工程数学的狭窄形式上,而更重要的还要强调在不同的问题上、不同的系统工程中要使用不同的模型。由此可以更深刻地理

解模型化(构造模型),并不是什么秘密和奥妙,只是运用某种信息载体来显示人们对于现实世界中的事物的认识,这样就得到了一个有关模型作用的两个重要推理。

模型无所谓真假,评价一个模型的好坏也不在于其简单与复杂,模型的价值只在于它的适用性和有效性。模型被用来显示客观事物的状态和状态变化,它反映了人们对客观事物认识的思维过程,并能帮助发展这种思维过程。

模型的上述定义和推理不仅丰富了关于模型的认识,而且还大大地开扩了对于模型的运用能力。现实世界和各类模型的关系如图 5.3 所示。

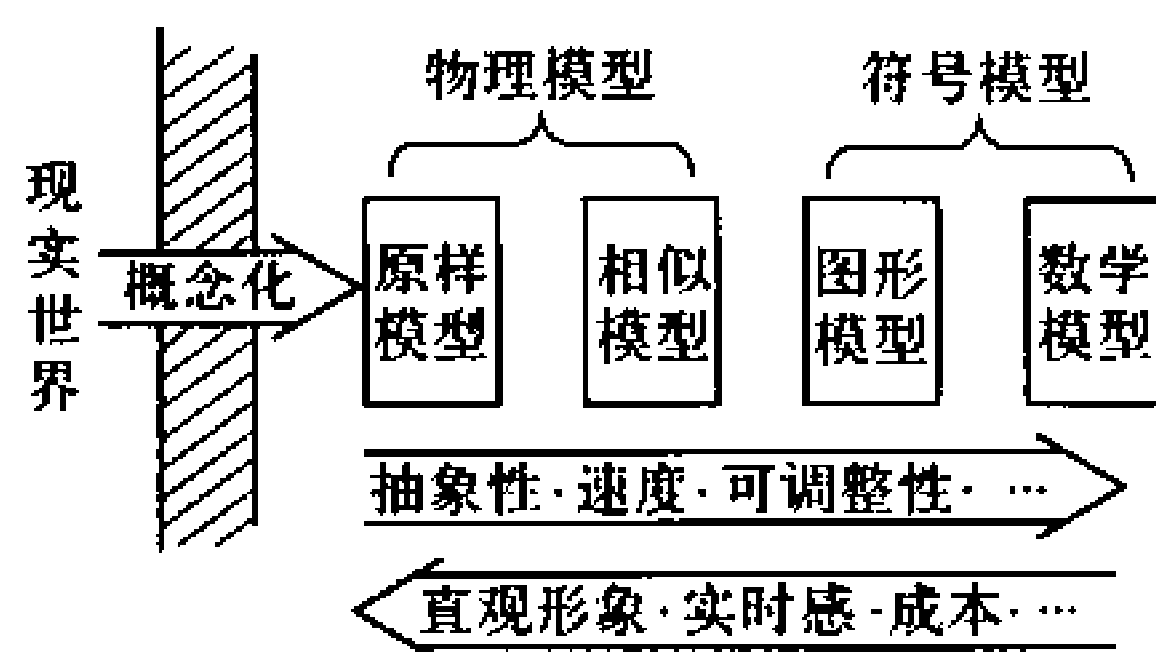


图 5.3 现实世界与各类模型的关系

原样模型是工程实体的雏形,通过它可以得到关于工程实体的信息,包括运用、效能、成本、尺寸等方面的大量的细微信息。因此,在生产或使用之前总希望能建造起这样的模型。于是,在武器系统的开发中就有这样的一条规定,只要有可能,任何武器都要造出原型并在实际环境中进行实验。即使像氢弹、远程导弹、战斗机这样大型的复杂武器系统,也要经过样机(样品)发展才能转入生产或使用。然而,对于一些超大型工程,如航空母舰、巨型水电工程就不能做原样模型了。当然,对于那些信息十分充分(即了解得十分清楚的)的工程,也不需做原样模型。

相似模型是通过替代物体与真实物体之间的相似关系,运用替代物来完成开发工程的一些专门研究、局部研究或整体性能的研究。例如:

(1) 地球仪,日月蚀演示仪;

(2) 飞行器的风洞实验模型;

(3) 传热、水坝压力的电模型;

(4) 模拟计算机;

(5) 用各种现实设备组成的对新系统的某些功能的实验等。

这里可以明显看到:第一,相似模型只能给出所要研究的新系统的某一方面的属性,如运动关系、性能等;第二,构造相似模型的一个根本概念是相似律,即相似模型的参数和实际系统的相应参数之间的特定关系。几何形状相似只是其中最简单的一种关系,地球仪和日月蚀演示仪属于这种情况。飞行器的风洞实验模型已不再是简单的几何相似了,也就是说它并不是飞机原样的按几何比例的缩小,因为

要使模型和实体有相同的空气动力特性系数，则必须满足雷诺相似和马赫相似准则，即

$$C = f(R_e, M_a)$$

式中 C——空气动力系数；

R_e——雷诺准则，反应流体的黏性；

M_a——马赫准则，反应流体的压缩性。

至于用另外的物理属性的物体来显示其与实际系统的相似关系时，如用电路来相似传热、水坝的压力时，极为重要的问题也是要建立实体的几何尺寸与所相应的模型的结构参数以及实体的物理参数(如温度、压力)与模型的相应参数之间的相似准则。

即使在某些条件下找到一定的准则，将在相似模型上得到的结果用在实际系统中也还是会遇到某些困难。例如，将小型火箭发动机所获得实验结果用于大型(大尺寸)火箭发动机上时就遇到振动燃烧的问题。现在的经验表明 60t 推力以下的液体火箭发动机不会有严重的振动燃烧，而当推力大于这一数值时，就必须改善发动机构造来应付振动燃烧问题。

各种模型在工程开发循环过程中的地位如图 5.4 所示。

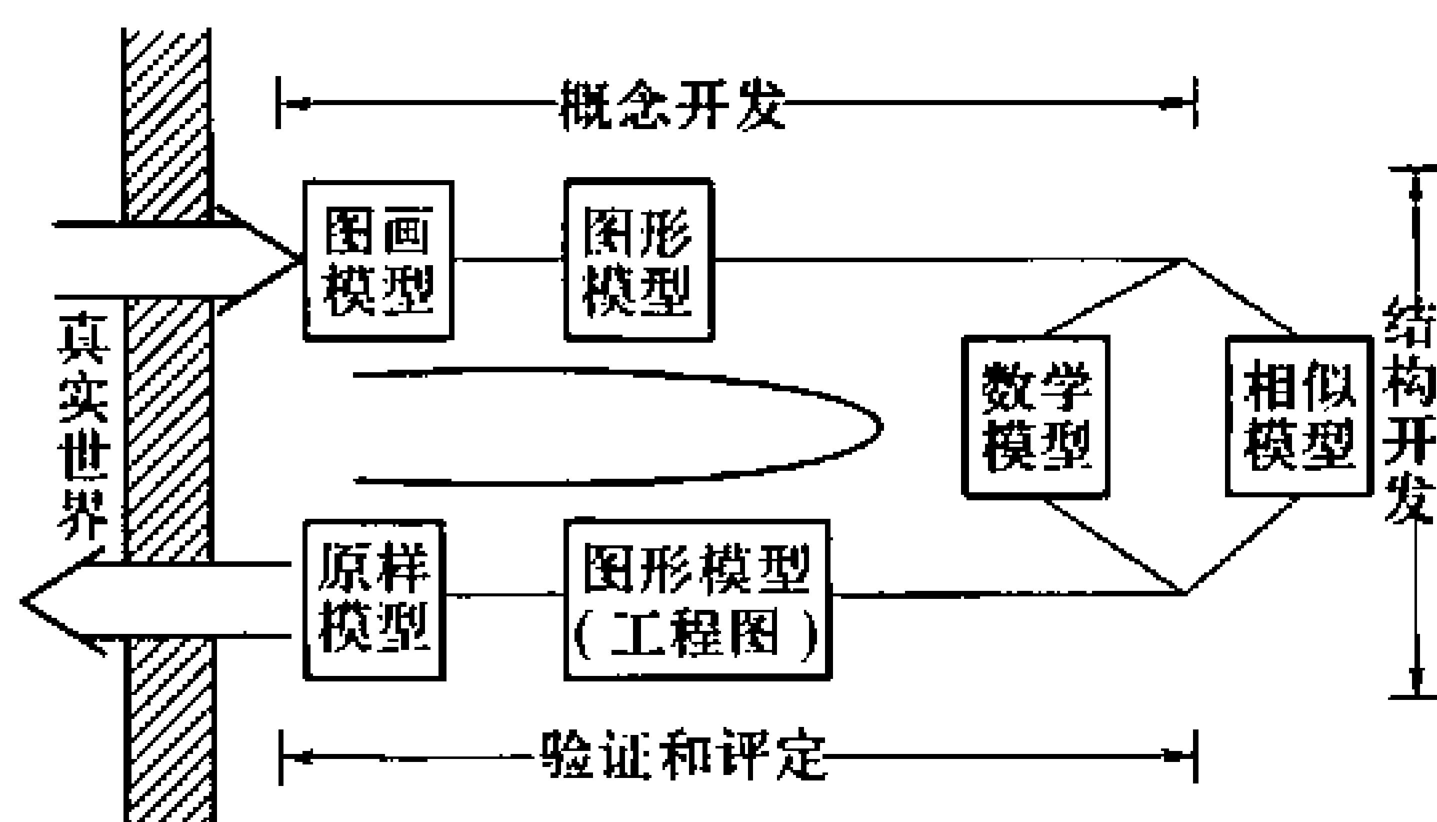


图 5.4 开发中各种模型的地位

这里所表示的当然只是就基本活动而言的，由于工程活动的复杂性，在主要使用图画模型时也可能要使用数学模型或其他模型来配合，而在主要使用数学模型时，也需要借助图画或图形模型来进行。而且在有些情况下可能并不像图 5.4 所画的那样经典，可能只使用其中的一种或几种，例如，在对所研究的系统了解得很透彻的情况下，就可能只使用数学模型或者只使用数学模型加工图。

图 5.5 表示更一般的工程过程中各类模型的使用情况，在工程的某一阶段上引出一条水平线，就可以得到与表示各类模型数量的三角形的交线的长度，它们将反映在这一工程阶段上所用各种模型分量的比例。这一情况所反映出的规律显示着工程开发各个阶段上活动的特点，有助于理解系统工程活动过程，从而也有助于

系统工程人员去估量各种模型的应用和主管人员对各个阶段上工作人员的素质进行选择。

由图 5.5，可以看到，在工程开发的初始阶段，以使用不严格图、近代数学、相似模型为主，它表明在确定问题和把问题展开的阶段，特别需要拿出新的思想和概念，而在工程开发的末尾阶段，严格图、经典数学、原样模型则是主要应用的模型。它表明这时要特别突出降低不确定性和保证满足工程实施的环境，即强调和各种工程技术手段相联系。图 5.5 还反映出各种模型的应用在一定工程阶段上只是主要的或辅助的关系，不可能自始至终只用一种模型就能彻底解决一个问题，更不可能全部解决一个工程开发阶段上的所有问题，这是非常实际的情况。为使对这种现实性有足够的注意，图 5.6 绘出了在战斗机的工程开发中使用各种模型的事例。当然，设计一架飞机的实际过程是极为复杂的，因此这里称为事例，而不是实例。

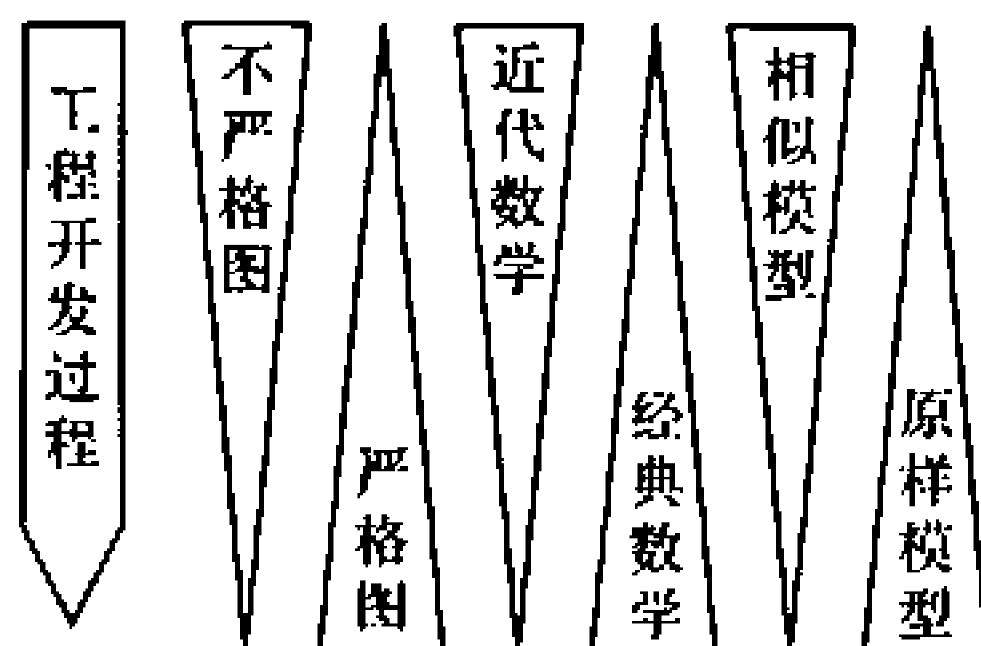


图 5.5　工程开发过程中各类模型使用情况

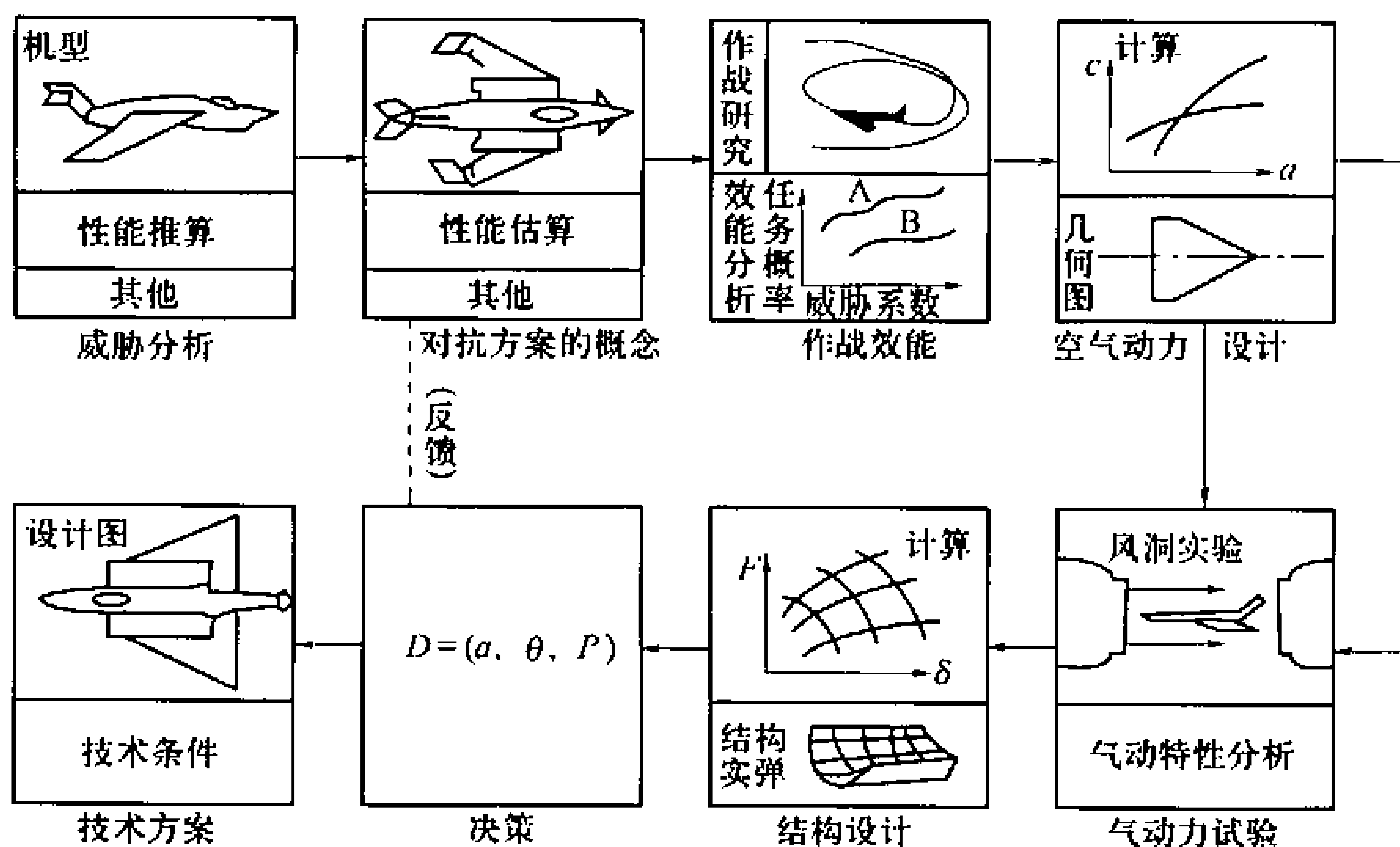


图 5.6　战斗机各种模型的应用

首先是对威胁的分析，往往所得到的是敌方飞机的外形图，由此可进一步运用各种工程知识通过数学手段去推算它的各种性能，这是一种主要使用的模型。必要时也要用其他模型来做一些实验。

第二项主要工作是提出对抗机型的概念设计，主要使用的也是图形和性能估算手段。

第三项工作是作战效能分析，所使用的模型将包括战斗数学模型、效能分析数

学模型。

第四项工作是在上述分析的基础上确定工程开发方案，主要是空气动力计算，由此保证飞机的战斗动力学性能。

第五项主要工作是空气动力实验，主要使用的是相似模型，同时也要做大量的分析和几何设计工作。

第六项主要工作是飞机的结构设计，包括几何设计和强度计算、实验等工作。

第七项主要工作是决策，主要是数学和逻辑分析，要选定准则、收集大量有关资料及自然环境、社会环境等方面的数据。这是一项极为重要且特别复杂的工作，也是宏观工程开发过程的反馈点，在图 5.6 上用虚线画了反馈线。之所以在这里加了“宏观”二字，是因为在整个工程中每一步重要行动都随之有决策（选择）问题，都要有相应的反馈，因此加上“宏观”二字与它们相区别。

经过开发决策后，编制开发报告时，为了说明各种类型的问题，在报告中几乎要使用到所有的各种符号模型。

5.4 数学模型的特点与分类

5.4.1 数学模型的特点

在上述各类模型中，数学模型具有下列一些重要待点：

(1) 高度的抽象性。直观性、形象性和实时感较差，包含了更多的理解和经验。

(2) 明确性。明确地表示了各种因素、变量和它们之间的关系。

(3) 可用计算求解。通过计算或模拟求解，并且通过计算结果可以了解到一些直观上难以得到的认识。

(4) 借助于数学模型可以处理变量很多、关系复杂的问题。

(5) 高的精度。在有意义的范围内取得高的精度。

(6) 适应性强。可以有多种用途或用于不同的实际问题中，如网络模型可以用到研究各种“流”的问题中，像电网运行、交通运输、通信、服务等。又如电工、空气动力、结构强度等的计算共同基于场的概念，它们有相同形式的数学模型。

(7) 可变动性好。修改参数或改变计算关系十分方便。

(8) 分析问题速度快。由于是符号推演，要比使用物体模型方便得多，当在计算机上进行计算时，那就更快了。

(9) 便于交流。无论是计算的准备资料、计算过程还是计算结果都是符号记录，交流起来很方便。

(10) 成本低。特别是性能优良、价格便宜的计算机越来越多，这一特点就显

得更加突出。

由于上述特点，因此通常所说的模型化过程主要指的就是建立数学模型的过程。

5.4.2 数学模型的分类

对数学模型进行分类，可以帮助我们在使用中选择适当的形式。然而，数学模型在不同资料上有不同的划分形式，往往不容易看到一个清晰的轮廓。这是由于从事不同工作的人员习惯于从不同的概念上来划分的结果。如果做一个综合性的分类，对于系统工程人员将是很有益的。借助于表 5.3，可以看到一个有关数学模型系统化的清晰的结构。

表 5.3 数学模型的分类

<table>
<tr><th>分类的定义</th><th colspan="3">形 式</th></tr>
<tr><td>数学结构</td><td colspan="3">非分析(代数的、几何的) A_1
图的 A_2
分析的 A_3</td></tr>
<tr><td>问题性质</td><td>确定的 B_1
不确定的 B_2</td><td>静态的 B_3
动态的 B_4</td><td>连续的 B_5
离散的 B_6</td></tr>
<tr><td>解的形式</td><td colspan="3">解析的 C_1
数值的 C_2</td></tr>
<tr><td>算法—应用</td><td colspan="3">经典工程数学的 D_1
运筹学的 D_2</td></tr>
<tr><td>系统工程实用情况 E</td><td colspan="3">系统结构的
性能的
任务过程的(如飞机的格斗模型)
支援系统的
可靠性的
时间的(如进度控制模型)等等</td></tr>
</table>

由此可以看到一个明确的数学模型分类系统(MMCS)，即 MMCS 包含数学结构、问题性质、解的形式、算法—应用、系统工程实用情况。各种模型之间存在着相互联系，可用图 5.7 来表示，这是一个一般系统图，在这个图上系统实用模型只用一个符号 E 来表示。由此可以看到，在各种资料中所见到的这样或那样形式的分类，只是图 5.6 的一个树形图，它们都可以由这个图画出来。在画出这样的树形图时，可以任何一点作根，并且把其他点排在任意的级序上。例如，在高登所写的《系统模拟》一书中，对数学模型所做的分类如图 5.8 所示。这个图就是图 5.7 中的 B_3,B_4,B_1,B_2;C_1,C_2 部分所组成的折叠树的展开树。

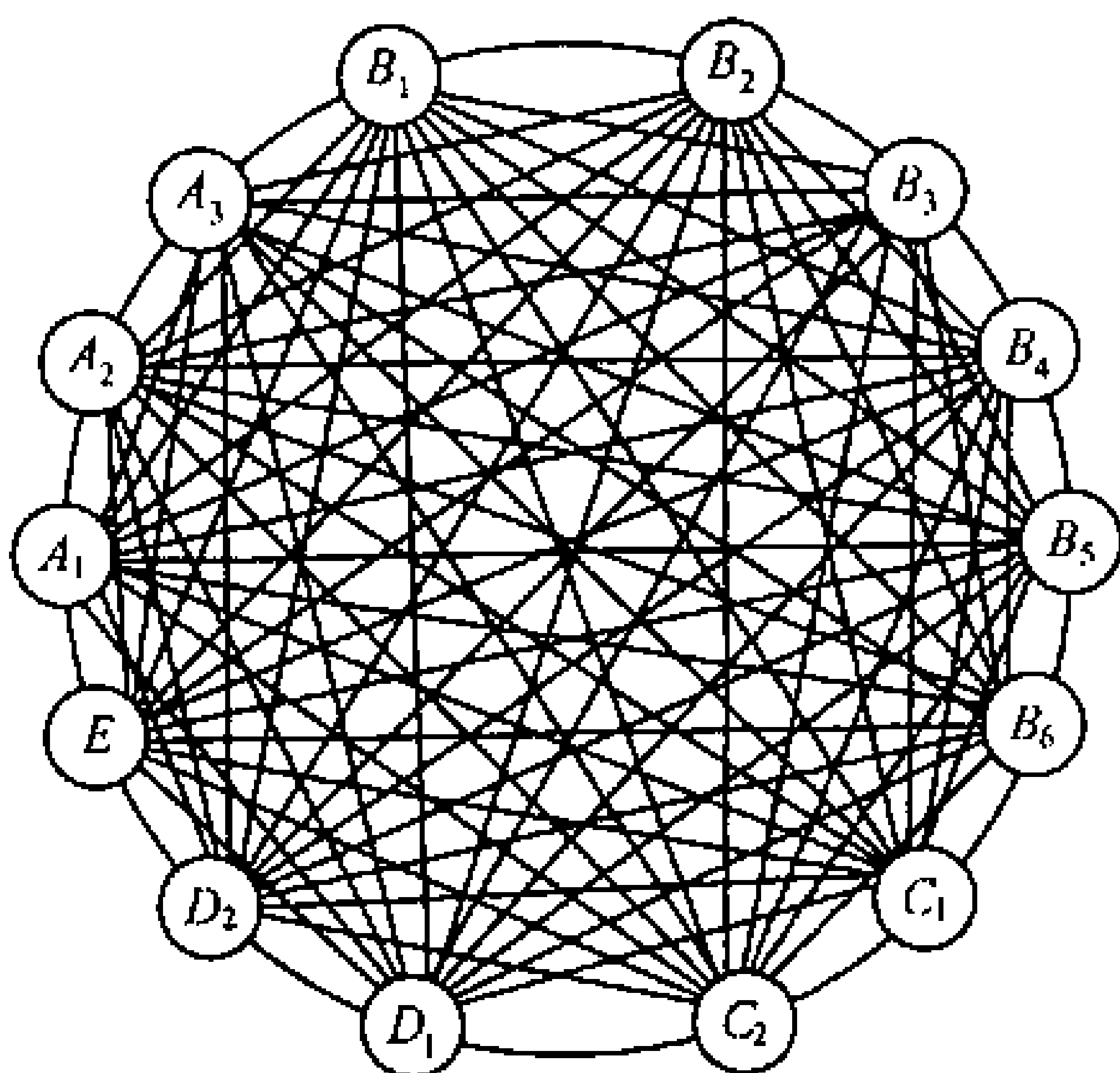


图 5.7　各类数学模型的系统图

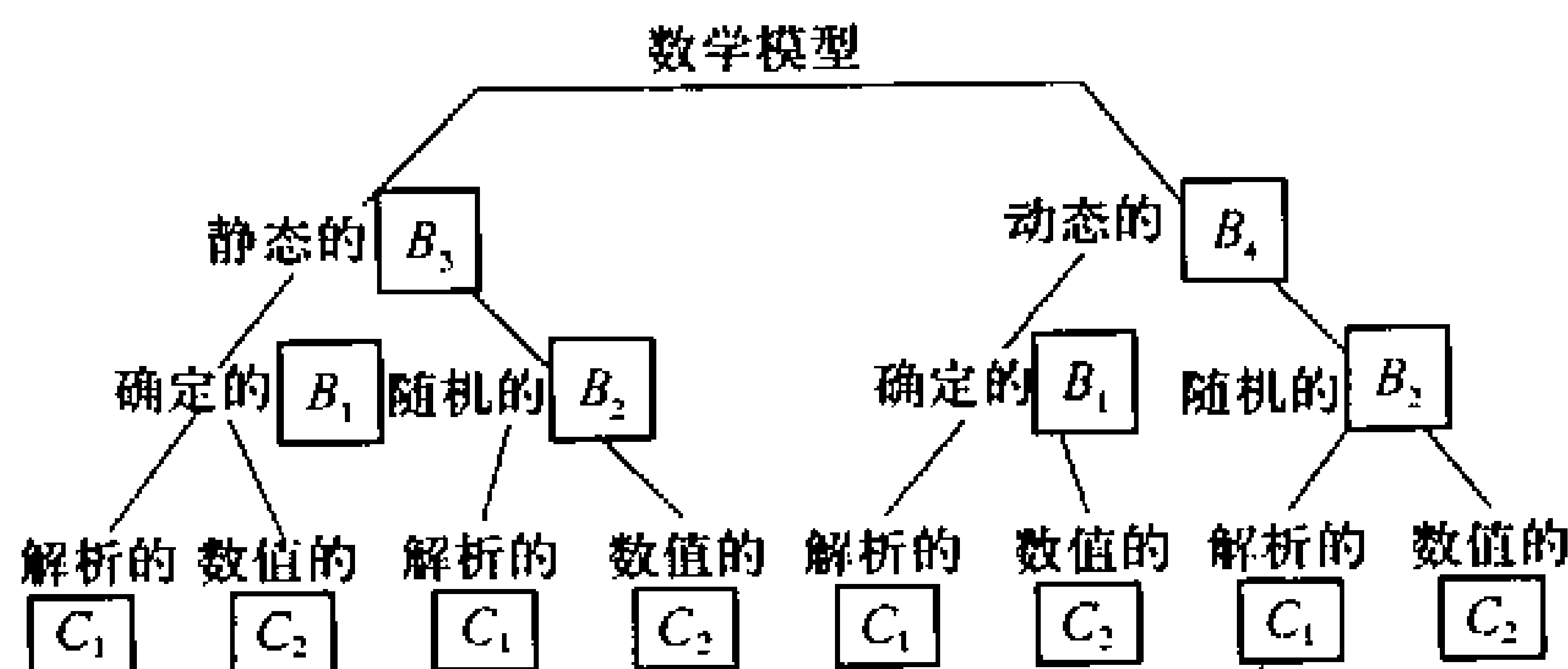


图 5.8　一种常见的数学模型分类图

5.4.3　对数学模型分类原则的说明

对数学模型分类,可从以下几个观点加以说明。

1. 从数学构成观点来划分

从数学构成观点来看,数学模型常常被分为解析的、非解析的和图的三类。解析的,即无穷小量分析,指用无穷小量的概念来研究函数:一个量对于另一个量的依赖关系。这种形式的数学模型最常用的有微分方程、积分方程、偏微分方程、积分变换等。

非解析的包括代数的和几何的形式。代数最初的涵义是变换表达式和解方程,用符号系统来表示一切量(变量和常量)和对它们的运算。现代代数把上述概念更加深化和抽象化了,对于“量”的概念不仅扩大到诸如矢量这样的领域,甚至更广泛地看作讨论“对象”。在工程技术中,由于代数模型计算上的成熟和方便,代数模型和解析模型一样被广泛地使用在很多问题上,如飞机的质量方程、设备成本等都可用代数模型表达,其一般形式为

$$V = \sum_{i=1}^{m} a_i \prod_{j=1}^{n} x_j^{\beta_{i,j}}$$

式中　a_i——系数；

$\beta_{i,j}$——指数；

x_j——变量。

此外，集合、群、格等代数形式也越来越多的用来描述系统的构造、评价等方面的问题。

几何与代数有密切关系，但几何是着重于研究各种量的“空间”关系。应当由代数中关于量的概念来理解几何中量所指的空间，这是一个有广泛含义的抽象空间。例如，在工程决策中，就常常看到在确定相似系数时使用“夹角余弦”和各种“距离”的表达式，如

$$r_{i,k} = \cos(\boldsymbol{x}_i, \boldsymbol{x}_k)$$

$$d_{i,k} = \sqrt{\sum_{j=1}^{p} (x_{ij} - x_{kj})^2}$$

图论是在近代数学有了相当发展以后才建立的。图论中的图不是物体的形象图，也不是几何图，而是由顶点和连接这些顶点的边线（有向或无向的）组成的用以表示各种关系的图。它能表达非解析问题，也能表达解析问题，有很强的表达能力，而且有自己的独特运算形式。在工程开发研究中，图是一种被广泛使用的数学模型。例如，描述系统结构的结构树以及决策树等树形图，还有状态图、博弈图等。

图 5.9 为一个求最短路径图，这是一个赋权的有向图。

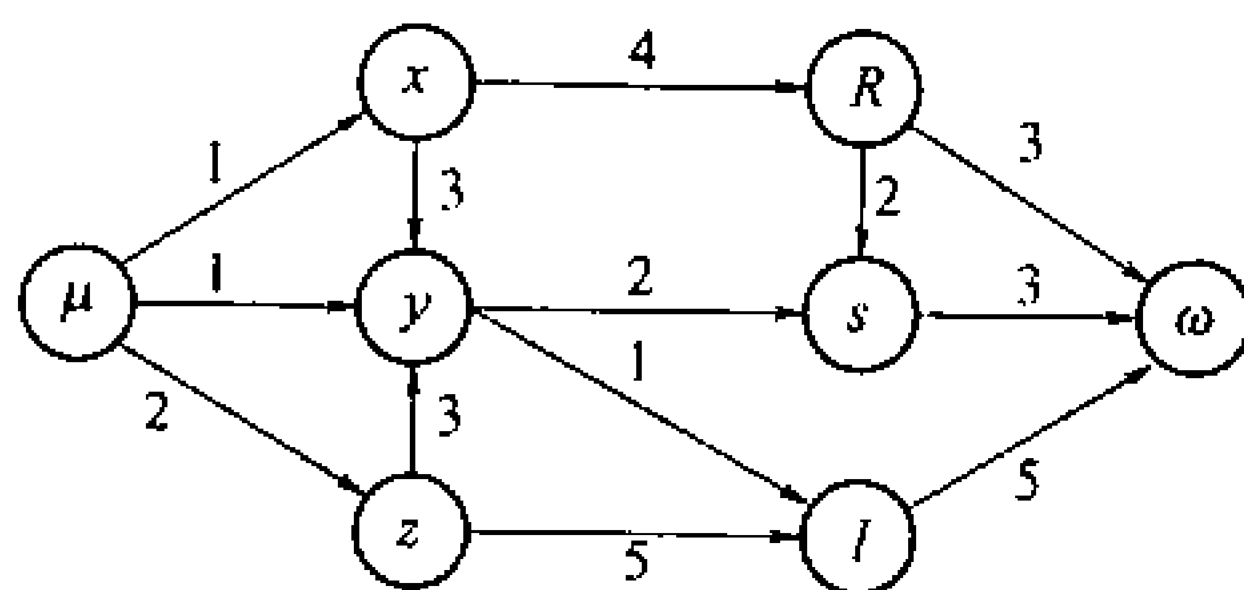


图 5.9　求最短路径图

图 5.10 为一个描述“想，想起来了”的思维活动。

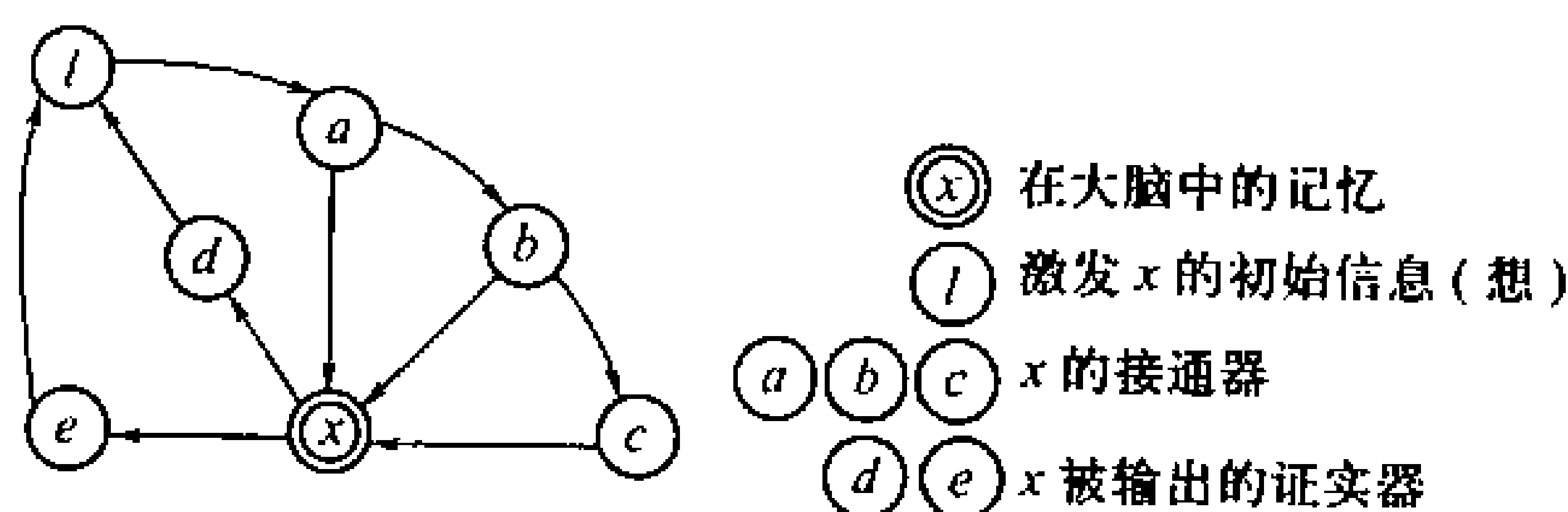


图 5.10　描述“想，想起来了”的思维活动

2. 从被研究问题的某些性质来划分

从被研究问题的某些性质来看，数学模型被划分为静态的和动态的、确定的和不确定的、连续的和离散的。

静态问题和动态问题的区别是比较明确的。静态问题描述平衡状态改变为另一种态势，从而可以导出各特征量的新的数值，但是不能显示出它们改变到新的数值的经历。图5.11所显示的是一个供、求关系的平衡，由它可以确定合适的市场价格。尽管供或求的任何一方发生变化都将导致平衡状态的改变，即平衡点的移动，但是由上述模型结构中显示不出这种变化的经历和趋势。

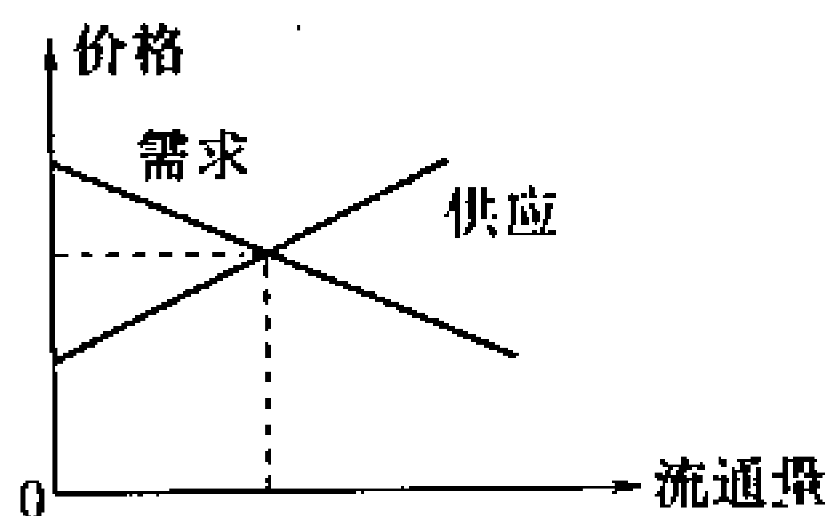


图5.11 供求关系的平衡

动态问题是研究系统的属性（如各种特征量的数值、系统的状态）随着时间变化的关系。例如，描述一个物体系统运动的微分方程，是最常见的动态数学模型：

$$x'' + ax' + bx = cf$$

然而，更一般的动态数学模型是用如下的方程来表示：

$$x = F[x,r]$$

只要适当地选择状态变量，工程技术中描述系统运动的微分方程都可以写成如上的形式。

确定和不确定的模型的区分应从问题的本质上来断定。例如，物体在力的作用下产生运动和变形；随着年龄增长人会衰老；生产力的发展会推动社会前进等，这些都是在一定条件下必然发生的现象。因此，这些都是确定性的。至于一个系统中部件发生故障，地球上出现各种自然灾害（如地震、冰雹等），这些都是不确定的。因为在一定的条件下，这样的事情有可能发生，但不一定会发生。这里当然要注意到，不确定性并不等于不可以认识。更有意义的是在工程研究中，把不确定性分为统计不确定性和现实不确定性两类。对统计不确定性，只能认识，而不能改变。如投掷一枚硬币，哪一面在上面这是不定的，然而可以认识到每一面在上面的概率各为0.5。对于现实不确定性，如气象状态、武器命中、战争态势的变化等，虽然亦使用统计不确定性来描述，但是通过更多的收集信息或对某些变量的控制，可以限制其不确定性，这是极为重要的。

连续的和离散的模型也是从问题的本质来划分的。例如，液体的流动、物体的变形和运动等都是连续的；射到地球表层的空间粒子、人口的数目，以及服务台对顾客的服务等则都是离散的。

应当把问题的性质和问题的处理方法分开，可以用不确定性问题的求解手段求解确定性问题，如用蒙特卡洛法求解积分和代数方程。同样，也可以采用离散问题的求解手段求解连续问题，如用差分法来解微分方程等。反之，也可以用确定性

问题和连续问题的求解手段求解不确定性的问题和离散问题。

3. 从解的特征来划分

从解的特征来划分数学模型也是一个重要的原则，这有助于在一定条件下选择所要使用的模型。解析模型，简单地说就是它的解必将是一个有特定形式的公式。并不是所有构造出的数学模型都有解析解。在没有解析解时，后者不便不必求出解析解时，用各种方法求近似解，也是一种数值求解的方法。数值模型是指，在研究未知函数的分析问题时，用数值参数的问题来代替本来的问题，只要这些参数知道了，就可以近似地计算未知函数。

4. 从算法—应用的基本关系来划分

从算法—应用的基本关系来看，数学模型可以分为经典工程数学模型和运筹学模型。经典工程数学模型包括微分方程、积分方程、微偏分方程、矩阵等，这些最初都是来源于物理系统的研究，然后才应用到分析社会方面的一些形式。但是，在社会活动的问题中，常常需要研究包含人的某些活动规律在内的问题，如求最短路径问题、最佳服务问题、货郎担问题、博弈问题、竞争问题等，于是，发展了一类运筹学模型，这就是规划问题、排队问题、库存问题、博弈问题和决策问题等。

从工程开发活动的角度来看，可以把来自物理系统对象的经典工程数学称为第一类工程数学，而把包含人的活动准则在内运筹学和能表达人的概念和思维过程的由数理逻辑，集合论、关系和函数、图论、代数系统、组合分析等近代数学所组成的"离散数学"称为第二类工程数学。

系统工程研究的一个重要问题是评定系统，而且是在多目标、多因素条件下进行的，这一评定最终表现为研究价值目标系统。

一个系统如能做出评价，至少可以建立起价值目标集，或者建立起不同方案之间的价值系统。于是，建立各种价值目标的数学模型就是必要的。

5.5 模型化过程

建立模形需要有一个模形化的过程，即需要有一个认识问题的辩证过程。模型是人们对事物认识的表达形式和工具，而不是研究问题的归宿，我们所关心的是把问题很好地表达清楚并得到满意的解。本节将从范畴（内涵和外延）、构造、集巢和规范等方面来讨论模型化过程。

5.5.1 模型发展过程中的辩证关系

依据上述模型化过程的概念，模型本身要被作为一个系统来研究。因此，模型方法论的重要概念之一就是范畴意义上的辩证过程，即对外延的限定和对内涵的开发过程，也就是一个不断深化的认识过程。这个过程也称为建模的辩证过程。

下面以开发某计算机工程为例来说明这个过程。只有经过这样的外延和内涵的辩证分析过程，才能把各项基础技术联系起来建成所要开发的并有现实价值的模型。通过讨论得到计算机系统的模型和一系列子模型，并且得到一些与原来设想很不相同的一些重要概念、涉及的有：关于系统的开发能力、可靠性，接口系统，决策和指挥过程等。

表 5.4

外延的界定	内涵的开发
1. 计算机	1. 计算机的概念 2. 计算机的分类和组成 3. 计算机的一般意义
2. 用于不同领域的计算机，如 科学计算 信息管理 通信指挥	1. 软件、硬件的特征 2. 系统概貌
3. 完成某种特定任务的计算机，如 空气动力特性研究 工厂管理 师级军事单位的通信指挥	1. 系统规模 2. 系统运用模型 3. 系统的结构模型 4. 计算机的逻辑结构
4. 使用环境，如 自然环境 社会环境	1. 器件选择 2. 组织结构 3. 保密措施 4. 可靠性设计
5. 价值约束，如 资源 成本 时间 效能评定	投资、进度、可得到的资源开发能力和兼容能力等的折中、权衡

5.5.2 模型化过程的构造方法论

从模型的构造方法论来看，模型化过程可用图 5.12 来表示。这个图可以写作：

$$M = ((O,U),(A,M),(R,F),(T,E))$$

其中，每一个元素又都是一个活动子集，将它们所包含的主要活动内容简要列出如下。

(1) (O,U)：观察和理解——

阐明对问题的见解和意向；

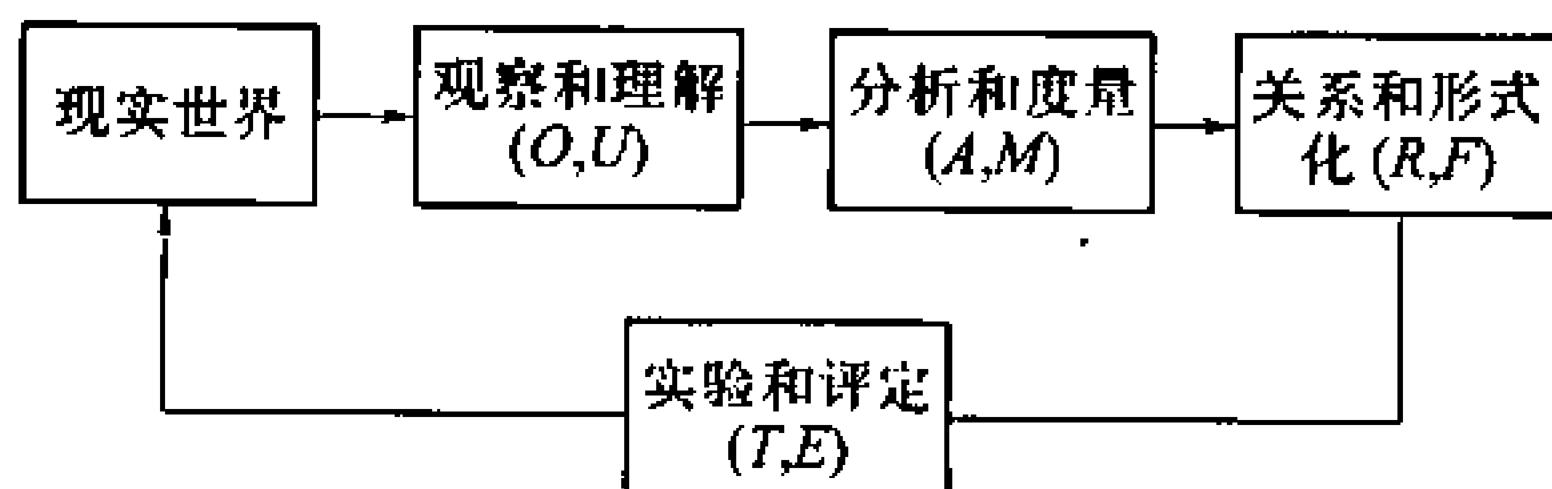


图 5.12　模型构造方法论的逻辑图

提出目的和目标；

搜索各种信息来源；

确定主要限制(时间限、活动域、资源限制)；

显示解决问题的各种途径(即提出概念性方案)。

(2) (A,M):分析和度量——

对解决问题的各种途径的设想和分析,明确系统的各种因素；

做出各种假设；

分析各种因素的性质(指出是否是常量、变量、可控,等等)；

推断所需要的某些数据；

建立效能评定准则。

(3) (R,F):关系和形式化——

判定问题的性质；

研究各种关系；

抽象化和典型化；

衡量各种因素的重要性(即影响的大小)；

制作适当的摸型(即用适当的形式显示出来)。

(4) (T,E)实验和评定——

构造模型过程是一个认识的不断深化过程,因而迭代过程是必不可少的。可以把迭代看作是一种特定形式的反馈(即阶段性的反馈)。因此,适当的反馈策略才能更好地改进模型的质量,于是,在(T,E)活动子集中主要包括准则集;反馈量的处理方式;均衡(比较得失)原则;排序。

5.5.3　系统模型的集巢化

发展系统模型的目标是为了有效地发展整系统研究,为此,要发展能反映整系统属性的一个模型集团,这个模型是本章讨论模型分类时按第五个划分原则所列出的各类模型的总体,如描述系统的结构或过程的、性能的、可靠性的、时间的、成本的、效能的等等,它们都是按此原则所划分出的各种评定模型。

建立这样一个模型集团时,还要求使用方便、灵活,并能有效的加速开发过程。

如果注意到系统在辩证意义上的相似性和系统结构中越是低级的子系统其外延越大而内涵越小等这样一些规律，这就是我们建立模块化模型系统的原则。这个模型系统的组成部分是独立的模块，而且有一个普遍的连接框，通过适当的编排和剪裁，就可以用这个框把一些模块连接起来，以此构成系统研究各个进程中所用的模型。这种构造系统模型的原则称之为系统模型的集巢化。这是一个非常有实际意义的概念和手段。

为此，所要做的工作如下。

1. 建立子模型的模块库

模块库也称为模型资料库。以开发飞机系统为例，其模块库可能包括以下一些模型：各种作战模型，如单机的空空格斗，空地强击和侦察、飞机对地空导弹的回避、飞机与雷达的对抗等。此外，还包括各种规模的作战模型，如战术的、战役的、战略的，等等。

各种空气动力组合的动力学模型，如各种机翼平面形状（直翼、梯形、三角形等），各种配置（机翼的高位、中位、低位等）以及整机空气动力布局的模型。

各种构件和构件组合的模型，如发动机、翼、机身、操纵机构、着陆机构的模型。

各种机载设备的模型，如通信、观测、电子对抗、安全设备、火器及火器控制的模型。后援系统的各种模型，如跑道、机舱、保养服务（水、燃料、零配件等）、通讯站、维修、备件库的模型。

应当指出，这些之所以称为模型，是因为它们和技术设计资料不同，它们不是强调性能、原理、工艺、尺寸等，而只是用来说明某一类问题。如上述例子所表明的，模型框可以用来做演习得到各种所需要的数据。为了说明这个问题，以开发一种飞机为例，有关作战的，就有很多种模型，诸如轰炸的（多次射击的损伤率等），多弹齐发的（发射距离和损伤率等），跑道损坏的（对切断跑道的武器的要求、起飞的可能性等），强击的（单发命中率、每次掠过一次的毁伤率等），对战的（各目的的毁伤率等），混战的（各目的的毁伤率等）；有关成本的，也有很多的模型，诸如运用成本（备件成本、后勤服务成本），后勤设备的运用和服务成本（地面设备的运转和服务成本），飞机的运用和服务成本（飞行业务成本、训练业务成本），电子设备成本（单个设备成本），飞机采购成本（生产成本、开发成本）等；实际上，由于还要分成若干层次，所以，它们还包括很多模型，对于开发一种飞机来说，这样的模型就多达数百个。

2. 按照系统的开发过程，进一步将各种子模型块构成系统的积模块

下面举例说明飞机外形模型的积模块的构造，如图 5.13 所示。

通过对飞机外形的各种有关参数的多次迭代修正，将能确定飞机外形的优化方案。

运用这一积模块，首先要通过运用各种基本子模型取得数据，然后再从积模块产生飞机外型的模型。

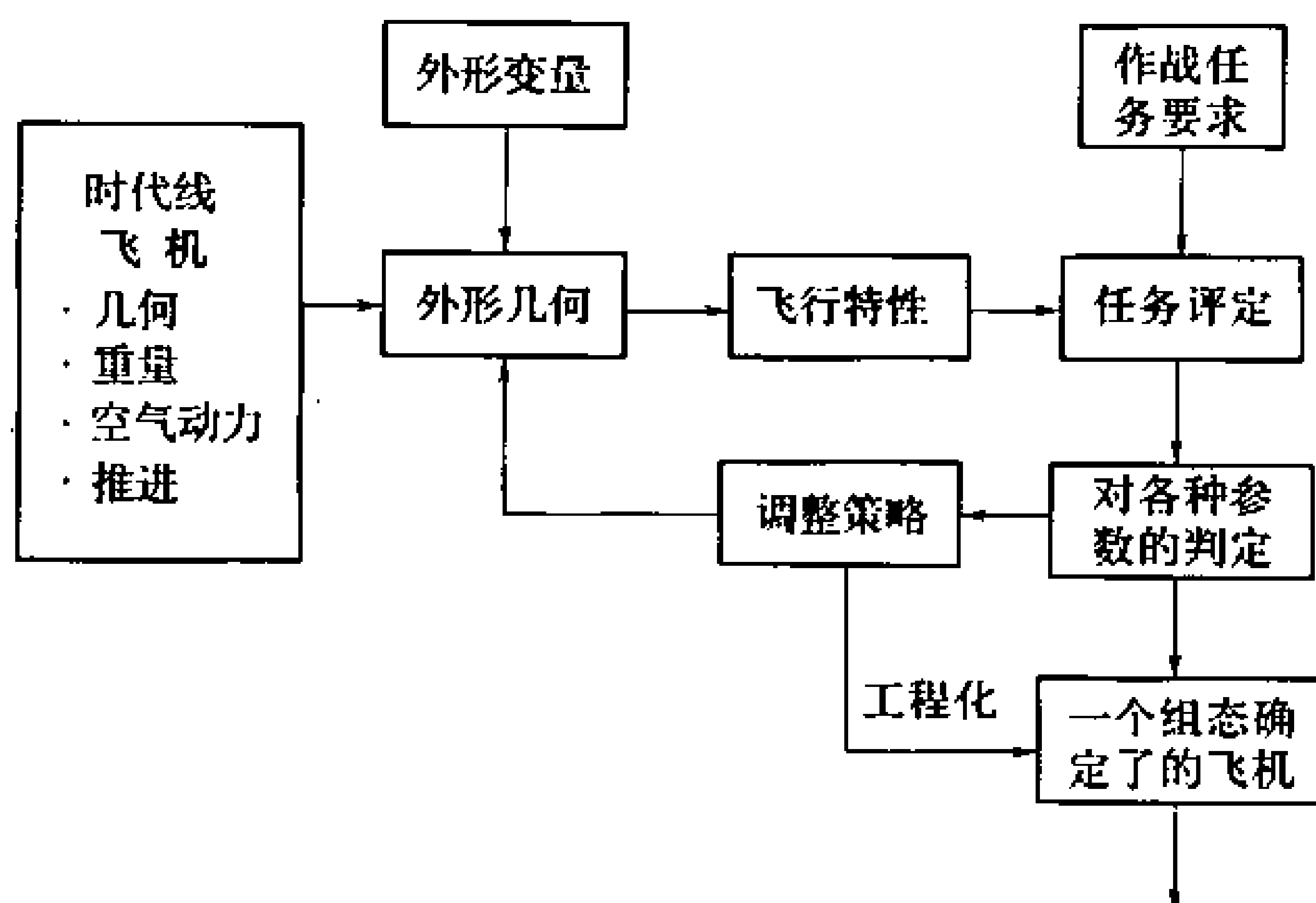


图5.13 飞机外形的积模块

时代线飞机是由模型库所保存的各种各样飞机模型经过加工而产生的，其参数是具有时代特征的飞机的参数组。外型变量是由空气动力模型集产生的，而作战任务则是由空战模型集产生的。在这个积模块模型的推演（分析）过程中，首先要依据时代线飞机的特征和外形变量建立起所要设计飞机的外形几何，一旦这个工作完成，所要设计飞机的一些特征数据，如外形的几何尺寸、形态（相对尺寸）、体积、面积、推力、气动特性、重量等也就随之可以确定了。接着所要做的工作是，根据作战运用模型集所产生的飞机性能要求来评定所设计的飞机，进而审查各种外形参数，并做出反馈处理。因为这些参数之间是相互有关的，所以要不断地迭代，以达到所希望的满足程度，在最后这一处理过程中，工程化具有十分重要的意义。工程化，就是选择与现有技术储备相适应的大部分数据，而只是对那些极为敏感的参数才建立新的规范。例如，对飞机的动力装置，一般是在现有技术储备中去做选择，甚至是在现有的型号中去进行选择。这种工程化处理，实际上是把人的决断能力加入到模型化过程中去，即除了效能原理开发和价值开发以外，还应有工程化的技巧和素养。

3. 建立一个综合的（或称整系统的）模型框来推演整系统的各个重要特征，即建立集巢结构模型

为说明这一点，下面举一个战斗轰炸机发展的例子。整体系统模型框架如图5.14所示。

通过各种作战模型的积模型（如由空中格斗、武器投放、对地空导弹的回避、对高炮的回避等组成的积模型）可以得到武器的效能和生存能力模型。建立生存能力和效能模型时需要引入可靠性和安全性的积模型。这个模型框的左半部分是基地保障，它由后勤和维修模型块、平均的备件和维修人员的模型块以及有效性模型块等组成。武器系统的生存能力输入到后勤和维修模型块以后，其输出是平均

备件和维修人员模型块以及有效性模型块的输入。最后由作战过程模型和基地保障过程模型的输出反馈给总成本积模型，产生系统的成本；由有效性模型和战役积模型反馈到武器系统效能积模型产生武器系统的效能。当然，还需要向战役积模型输入作战目标、威胁情况和打击对象的数据等。

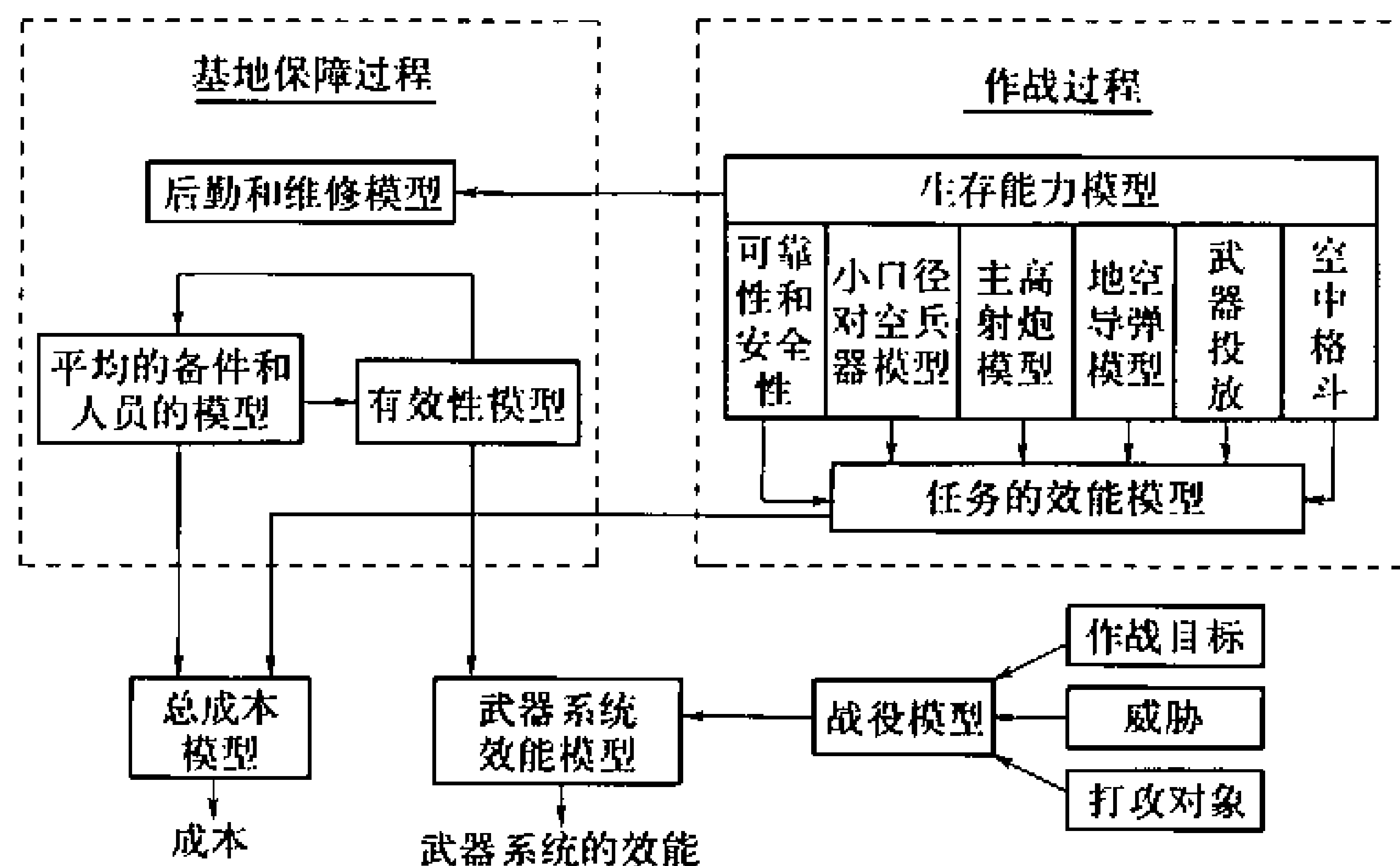


图 5.14　整体系统框架

在以上讨论中，只讲了两个层次，一个是积模型，一个是整系统模型框，但在实际工作中，可能会有更多的积模型层次。这些从系统具有辩证意义上的相似性来看，是完全可以理解的，因为由基本模型块可以建立起各个阶层上的积模型。这也就是说，在低层的系统中包含着确定高层系统的因素。但是系统模拟不是由低层系统模型块简单堆砌成的，它们各有各的结构特征，然而所有各层上的模型结构又都有一定的相似之处。

运用基本模型块建造系统模型的逐层构造过程如图 5.15 所示，它很像一个鸟巢，于是又将其称为集巢结构。从本质上来说，正如前面所指出的，是系统在辩证意义上的相似性概念的发展。

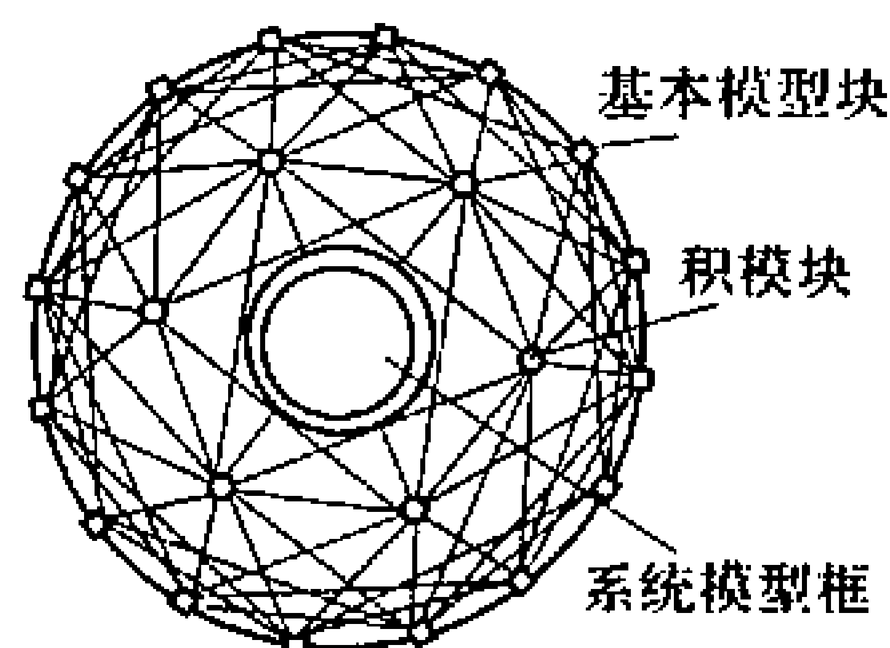


图 5.15　系统模型的集巢结构

5.5.4　模型化过程的规范化

为了清晰地、有步骤地处理模型化过程中的各种因素和问题，还必须从建模活动的规范化来讨论，这也就是模型化过程的规范化。从规范化出发，认为建模活动有 3 个基本的意向程序，它们是建模活动的基本研究、开发研究、完善研究，如图 5.16 所示。

把建模活动这 3 个意向程序分明化，就能把建模过程的各种活动有序地展开，下面就每一个意向程序进行讨论。

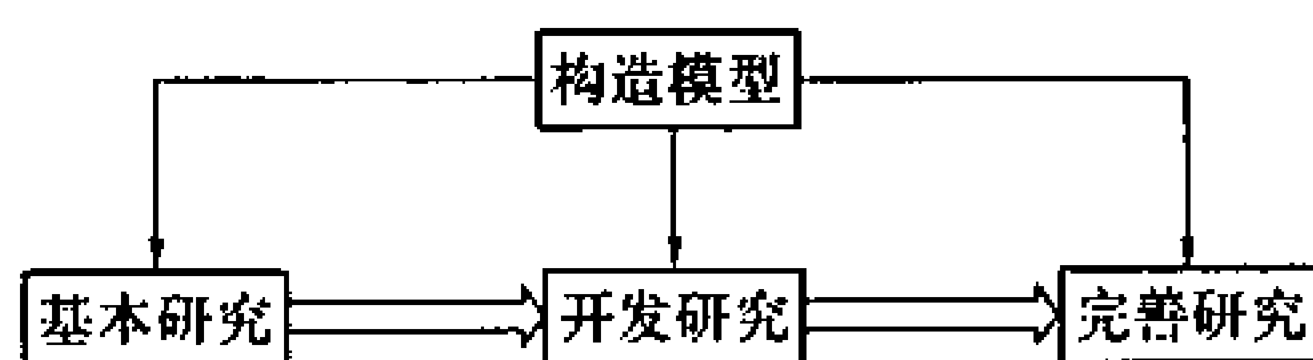


图 5.16　建模过程的规范化

1. 建模活动的基本研究

明确模型的目的、范畴和它所研究问题的变量，是建模过程开始时所必须做的基础研究。它所涉及的内容列在表 5.5 中。这里无需多加说明。只需指出：目的是由对问题的理解而明确的，范畴是由分析目的和环境而限定的，变量则是在综合目的和范畴的基础上确定的。

表 5.5　基本研究的内容

基本研究→开发研究		
目的	范畴	变量
问题的性质	环境	属性（物理的、社会的）
问题的地位	复杂性	控制性
意图	不确定性	确定性
功能	不分明性	随机性
开发	因素	输入
描述	资源限制	输出
辨识	时间限制	
运用		
评价		

2. 建模活动的开发研究

基本研究以后还不能立即建造起一定形式的模型，要确定模型的形式和结构，还需要有一个开发研究活动。这个活动过程包括概念开发、理论和经验的准备、技术准备和做模型等具体活动。每一个活动所涉及的内容见表 5.6。和工程开发一样，建立一个好的模型最根本的不在于技术（形式），而在于概念的高度，即对问题认识的深度。

表 5.6　开发研究的内容

开发研究→完善研究			
概念开发	理论和经验	技术	做模型
价值	物理规律	工程数学	工作程序的
开发	社会学理论	运筹学	参数推演
效能原理	经济理论	计算设备	问题发展阶段
组态	历史资料	程序语言	数据的充分性
过程	逻辑分析	模拟技术	数据的精确性
性能	做假设		数据的即时性

3. 建模过程的改善研究

编制出一个模型的形式,并不是模型过程的完成,只有在经过改善研究以后所确定的模型才是有效和实用的。这个改善研究过程所包括的内容见表 5.7。

表 5.7 完善研究的内容

完善研究		
加工新数据	有效和稳定	变量
对问题的深入理解	与所研究问题的冲突	简化
模型运用中的问题	与环境的冲突	精密化
精度分析	资源限制	兼容
结构	时间限制	通用化
	可靠性检验	模块化
	敏感性检验	

改善模型首先要加工新的数据,这是借助于初始模型对所研究问题取得认识上的深化的表现。有了新的数据,就可以进一步解决模型在使用中的有效性和稳定性方面的各种冲突,并且可以进一步缩小和确定各种限制因素(如资源、时间、可靠性)的影响。改善后的模型,即投入系统研究中使用的模型,在简化、精密性、兼容性、模块化、通用化等方面,比开发研究所得到的结果有了明显的提高。

从以上分析可以看到,建立模型过程的规范化是为了提供模型化过程的程序和逻辑结构,以利于对系统进行深入研究。

5.5.5 系统模型研究的一个简单例子

系统的开发,从研究的行动程序来看,是一个依次从不同的等级上展开研究的过程,即把一个系统划分为若干相关的子系统,然后通过对子系统结构的进一步研究,以取得对系统的更深入、全面的认识。

由于系统在辩证意义上的相似性,我们可以把子系统也看成是一个"系统",然后再划分为若干相关的子系统来研究,从而取得更进一步的认识。可以看到,所有这些依次进行的过程中,研究的方法都是一样的,即由一个初步的总的认识进行分解,然后研究被分解后的各个部分及它们之间的联系,最后再把这些研究结果综合起来。这样一个过程显示在图 5.17 中。

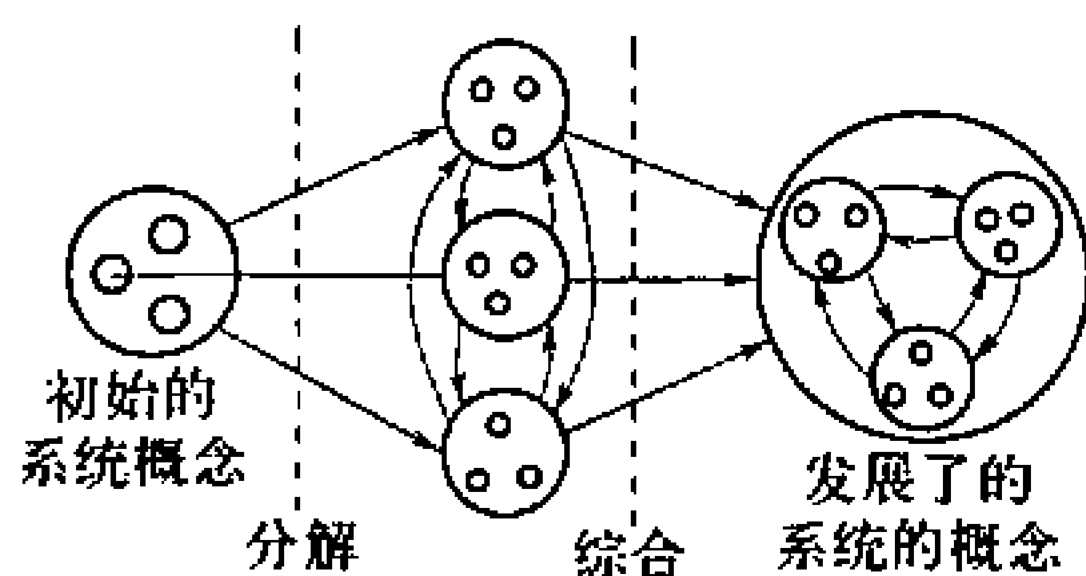


图 5.17 系统研究的基本过程

下面以一个工程开发系统为例，说明系统开发的过程。显然，只需要分析其中一级的展开过程就能显示出上述方法的全过程。

1. 初始系统概念模型

工程开发系统的初始系统概念模型如图 5.18 所示，它包生产、管理、环境等 3 个部分。

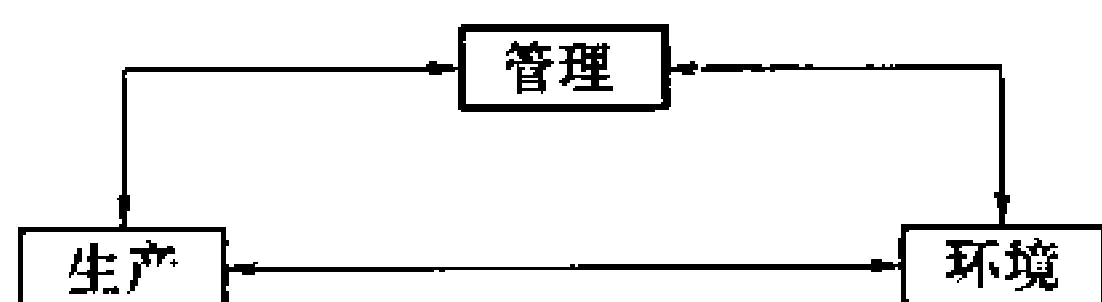


图 5.18 初始系统概念

2. 分解后的子系统模型

1）环境子系统的模型

开发一个新的工程系统，其关键的环境因素是流通市场，如果不能保证流通，工程就没有开发的前景。于是，可以以流通市场作为中心来构造环境子系统的模型，见图 5.19。

围绕流通可建立起影响流通的各种子模型，它们是：

人口系统模型块，决定市场（流通）的能力和属性。

竞争系统模型块，决定市场的属性。

国民经济模型块，市场是其一部分。

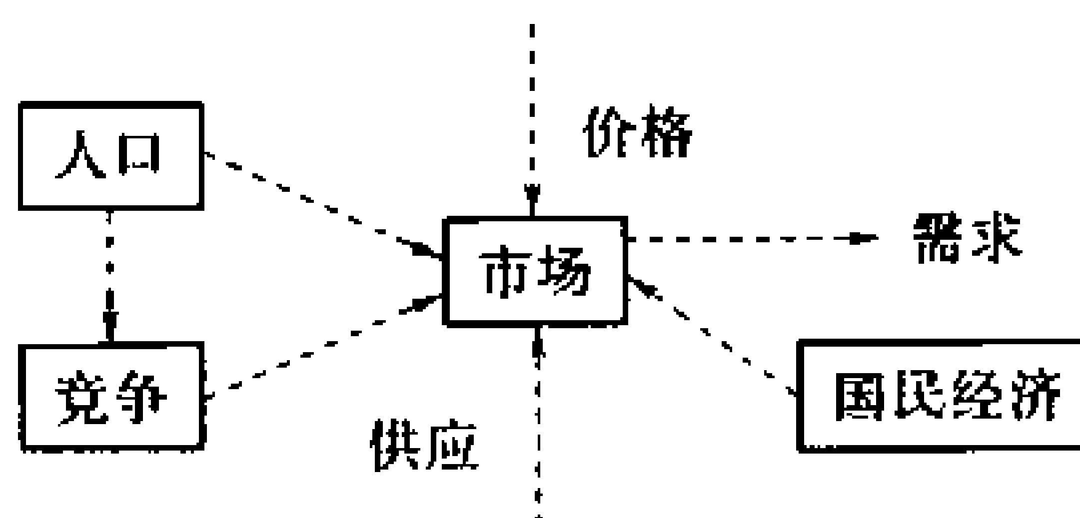


图 5.19 环境子系统模型的结构

流通市场模型块，它是环境子模型的中心部分，流通的枢纽。

这里的各种模型块并不是这些领域的普遍的总模型，而只是该活动领域与市场有关的部分模型。有了这一步工作，就不会使所处理的实际模型过于复杂和庞大，然而，做这一步工作是相当重要的，也是相当困难的。这些模型块共同决定了市场模型的属性，即供求和价格的关系，在图 5.20 中画出了线性和非线性两种形式。

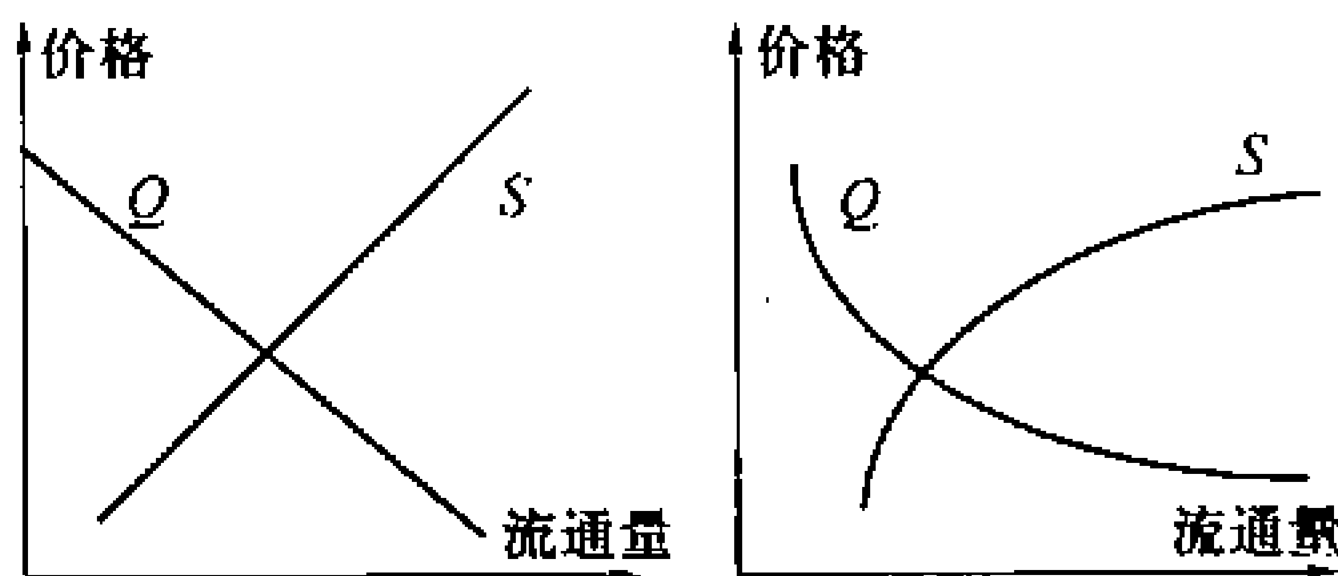


图 5.20 环境子系统的模型

通过调整人口、竞争、国民经济等模型块，将能改变市场的供求与价格之间的关系，即 Q，S 的参数，也就改变了市场模型的属性。

2）生产子系统的模型

生产子系统的模型是以生产过程模型块为中心的，其输入为劳动力、生产设备和生产技术，输出为产品。生产活动受国民经济以及产品分配系统的约束，于是，可建立起这些部分的模型块，并将它们与生产过程模型相连接，如图 5.21 所示。

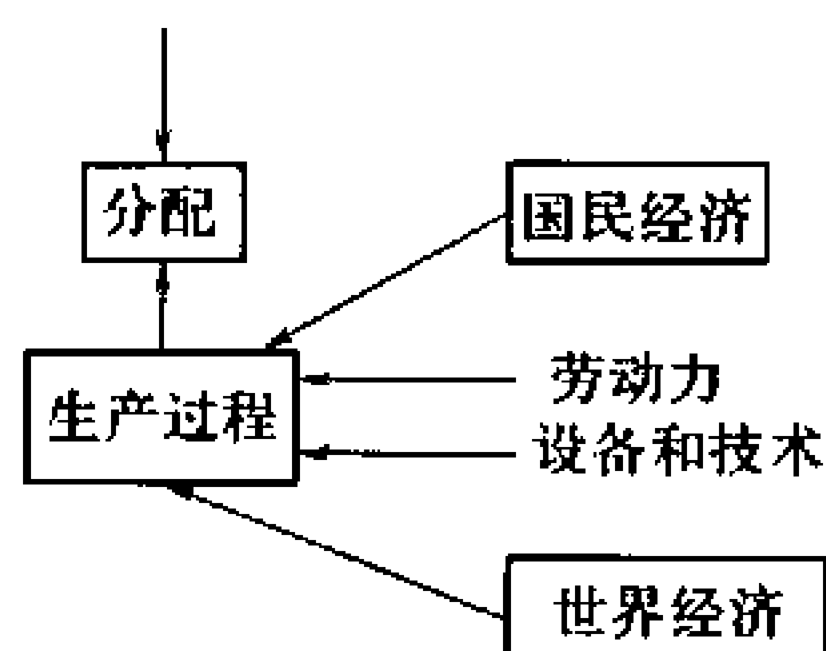


图 5.21　生产子系统

国民经济、世界经济和分配影响着生产过程的进行和动态特性（效率），这些因素自然对市场也有影响，在图 5.21 中已经显示出了这些关系。

3）管理子系统模型

当进一步把管理子系统展开时，可以得到如图 5.22 所示的管理子系统的模型图。

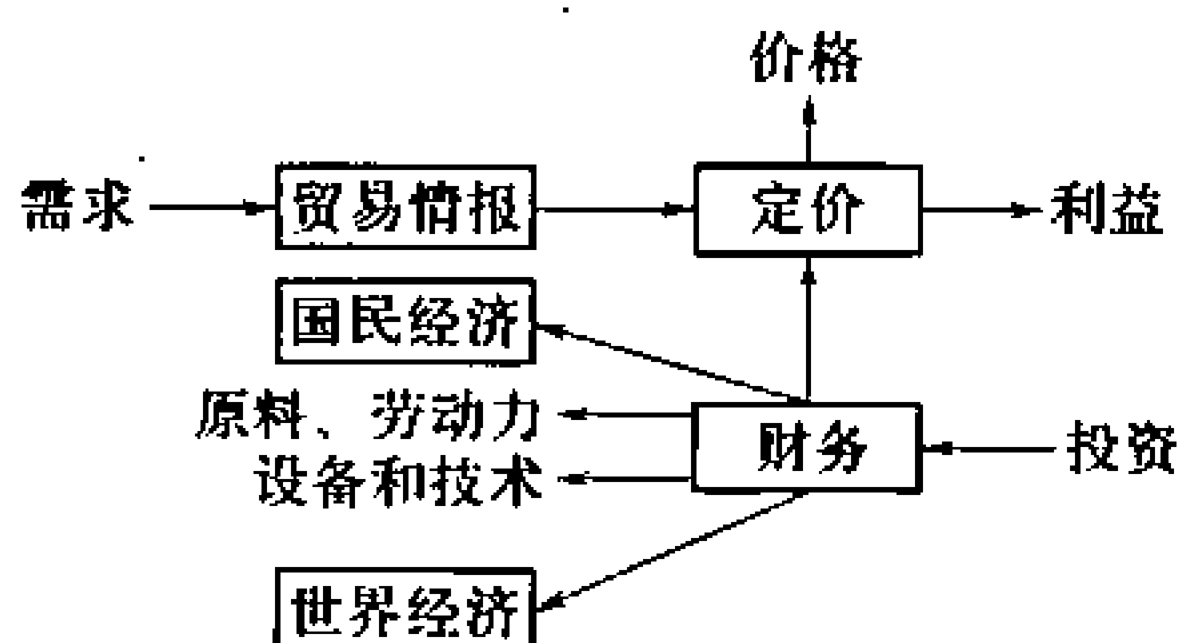


图 5.22　管理子系统

在管理子系统中，财务活动是它的中心。在研究国民经济、世界经济影响的基础上，衡量投资的来源后就可以做出组织和安排生产的决策。这一切活动的最终表现是财政分配，通过财政分配得到生产所需要的各种要素，如劳动力、设备、原料，等等。

另外，将财务分析和贸易情报分析（测算）所得到的结果送入定价模型，由定价模型给出价格和所得利益。自然，国民经济对定价会有影响，也应予以考虑。

3. 整个工程开发系统的进化模型

把各子系统展开了的模型连接在一起，就得到进化了的整个工程开发系统的模型，如图 5.23 所示。到此，我们就把原始的、简单（只有三个元素）的系统模型进化为一个有 10 个子模块组成的系统。

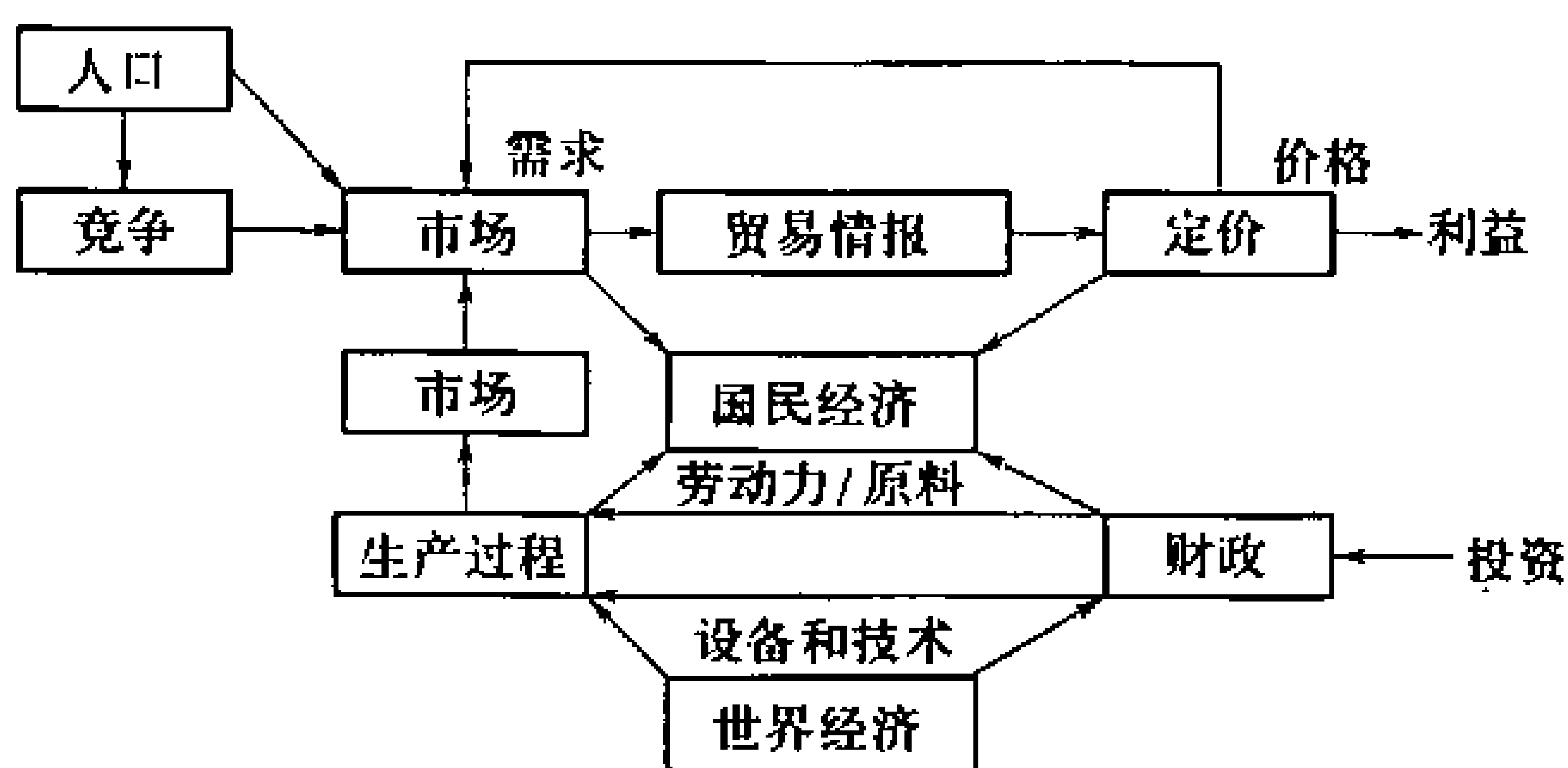


图 5.23　整个工程开发系统进化模型

在发展模型的过程中，最重要的是对问题的充分熟悉并应有明确的目的性。在前面曾经提到过，恰当地建立模型块是十分困难的事，其原因就在于此。

参考文献

[1] 赫伯特·爱德华. 论真理[M]. 周玄毅，译. 武汉：武汉大学出版社，2006.

[2] 陈庆华，谢政. 整数规划[M]. 长沙：国防科技大学出版社，1992.

[3] 杜玠，陈庆华. 系统工程方法论[M]. 长沙：国防科技大学出版社，1992.

[4] 杜玠. 论系统工程[J]. 国防科技大学学报，1980.

[5] 杜玠. 模拟的若干基本问题的讨论[J]. 军事运筹，1987.

[6] 杜玠，韩锡桐. 可靠性工程[J]. 自动化，1980.

[7] 杜玠. 工程开发的系统决策问题[J]. 科学探索，1981.

[8] 刘兴堂，梁炳成，刘力，等. 复杂系统建模理论、方法与技术[M]. 北京：科学出版社，2008.

[9] 防务系统管理学院. 工程项目管理手册[M]. 国防科工委军用标准中心，译. 北京：航空工业出版社，1992.

[10] Booz，AlleD & Hamiiton Inc. 美国系统工程管理[M]. 国防科工委军用标准中心，译. 北京：航空工业出版社，1991.

[11] 防务系统管理学院. 系统工程管理指南[M]. 国防科工委军用标准中心，译. 北京：国防工业出版社，1990.

第6章 系统模拟

系统模拟在系统工程和系统分析中的作用十分重要。本章先从四个例子入手，说明即使在日常生活中，系统模拟也是经常用到的；进而研究了系统模拟的分类，介绍了蒙特卡洛法、系统动力学方法的分析过程等常用的系统模拟方法。

6.1 实 例

首先看四个例子。

[例6.1] 一滴汽油能污染整个游泳池吗

1997年夏季的一天，装备指挥技术学院邀请国家部委的领导参观航天员训练中心的游泳池时，一位解说员说，航天池是专用的，要保持游泳池里的水非常清洁，哪怕有一滴汽油也会污染整个池面。当然，一滴汽油滴在游泳池的水面上，会在水面上显现出五颜六色的光环，自然能看到污染了多大面积，那么一滴汽油真的会使整个游泳池的水面都变成五颜六色的光环吗？

本书作者当时是这样想的，以便在尽可能短的时间内，给出一个大致的定性结论，实际上是采用模拟的方法。

（1）汽油是多种烃的混合物，不妨假设汽油的主要成分是庚烷，C_7H_{16}。

（2）一滴汽油大致有多重？先粗略地考虑一滴水是多重。在医院里，一瓶500g的吊瓶输液，静脉注射1min60滴，大约用66min滴完，也就是大约滴4000滴，也就是说一滴水大约0.12g。不妨设汽油的相对密度是0.8，那么一滴汽油就是0.1g。

（3）一滴汽油包含多少个分子呢？庚烷C_7H_{16}的相对分子质量是100，即100g庚烷是1mol，1mol有6.023×10^{23}个分子。即是说一滴汽油包含6.023×10^{20}个分子。

（4）一滴汽油中所有分子单层排在水面上有多大面积？不妨假设每个分子的直径是10^{-8}cm，那么每个庚烷分子大约占据$10^{-16}cm^2$的面积。于是一滴汽油中所有分子单层排列起来，大致占据的面积最多不超过$6.023\times10^{20}\times10^{-16}(cm^2)$，即大致为$6\times10^4(cm^2)$，即大致为$6m^2$的面积，显然不会污染整个游泳池的水面。

上面所给出的定量计算方法，看起来好像是精确的，其实不然，这仅仅是一种模拟的方法，一滴汽油未必是0.1g，汽油未必是庚烷，一个庚烷分子的直径未必是

10^{-8}cm,等等,仅仅是用我们比较熟悉的事物近似地描绘未知的现象。

[例6.2] 排列结构与信息传递

很多人集合在一个很大的操场上,位居中心位置的是信息发布者,希望尽快地把一条信息发布出去,但他不能用广播的方式,只能将信息告诉与他最靠近的人,怎样排列,才能尽可能快地将信息发布出去。同样我们可以用模拟的方法加以分析,如果把每个人都看作一个圆柱体,那么在操场上的排列就是下列两种情况,如图6.1和图6.2所示。

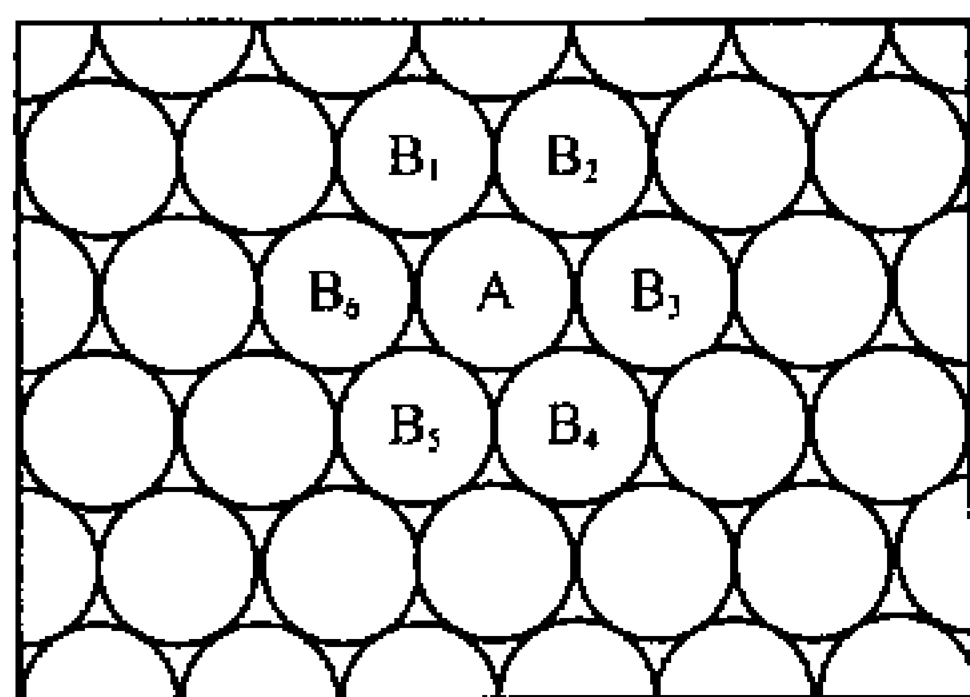


图6.1 缝隙最小的排列

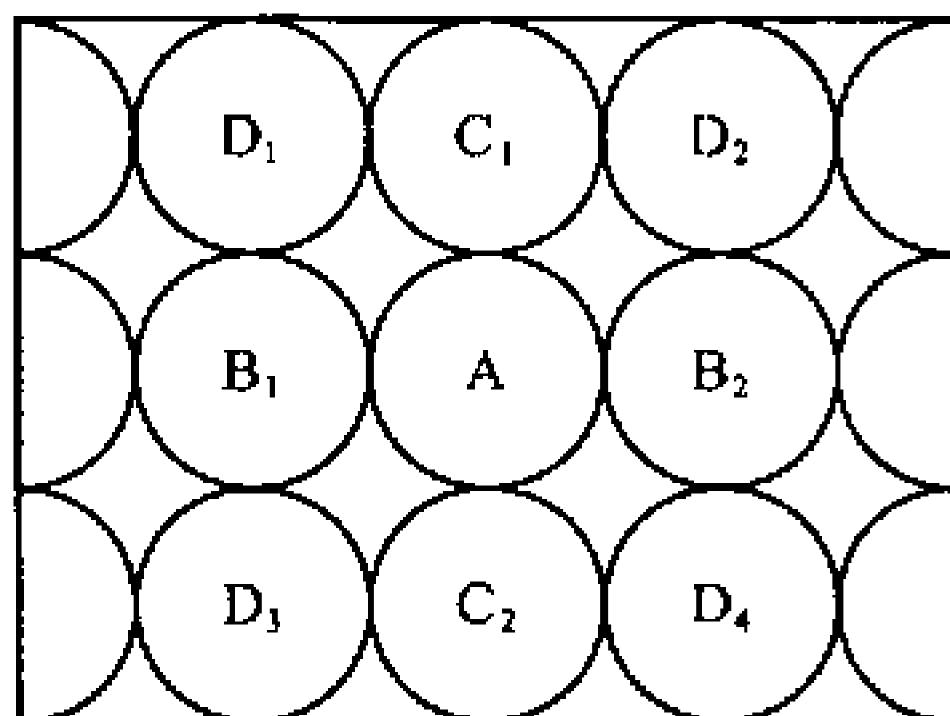


图6.2 方方正正的排列

图6.1所示的第一种排列形式,中心发布者需要告诉周围的六名成员,形成七人领导核心。

图6.2所示的第二种排列形式,中心发布者有几种选择:第一种选择,可以同时告诉左右两位成员,形成三人领导核心;也可以同时告诉前后左右四位成员,形成五人领导核心;还可以同时告诉前后左右东南西北八位成员,形成九人领导核心。

由此看来,这第二种排列形式,可能更加灵活。

至于信息发布的速度,可以通过编写程序计算。假如有1000人左右集合在圆形操场上,A位于操场的中心,A用1min的时间将一条信息同时告诉给他周围的人(六个人或八个人),他周围的人获取信息后,用1min的时间,将这一信息同时告诉给他周围尚未获得信息的人,如此做下去,最终通过若干层(18层或15层)依次传到最外围的人。通过编写计算机程序可以得到两种排列的信息传播的效率。

这实际上是一种模拟,事先并不知道操场上的人是以何种方式排列的,他们的高低胖瘦也不同,只要是集合在一起,使用上述两种排列总是符合实际的。

[例6.3] 组织一次学术年会

2009年6月25日,一位从事任职教育的教员,为了承担"管理干部培训班"课程《如何组织会务工作》,以该教员亲自组织的某次会务工作为案例,举行了一次课程教学模拟。本书作者全程听完了这次课程,受此启发在座谈会上,作者以亲自组织的一次会议为例,就会务工作必须注意的几个问题,作了即席发言。

1984年10月在国防科技大学,召开了军事运筹学学术交流会,来自全军的

100多名军事运筹学工作者，积极建议成立全军军事运筹学学会，获得上级批准，学会的具体工作由国防科技大学牵头。

1985年春节前后，军事运筹学会常务理事会决定，由本书作者代表军事运筹学会办公室到北京协调有关单位，要在北京召开军事运筹学会成立以来的首次学术年会。目的是，通过在北京某部队单位召开军事运筹学会学术年会，邀请总部有关领导和著名科学家到会，邀请重要媒体和著名记者到会，扩大军事运筹学会的影响，能够起到在高层决策部门宣传军事运筹学的作用。

1985年8月，本书作者受军事运筹学会常务理事会的委托，专程到北京进行选点。初步选定在海军装备论证中心召开。海军装备论证中心的余潜修教授、柳克俊总工程师、军事学院的王常杰、后勤学院的刘天禄、工程兵部的谭国玉等都表示支持。

后来听说，要在军事学院的基础上于1985年10月成立国防大学。大家认为，在新成立的国防大学召开这次学术年会更有宣传价值，研究决定，首次学术年会定在国防大学召开。但是，等到1985年10月中旬，关于国防大学何时成立仍然没有消息，考虑到北京的气候，不能拖到12月份召开，只好再次发出会议通知，通知称，会议将于1985年11月26日至30日在北京红山口甲1号招待所召开，关于会议报到地点并不注明是在军事学院，还是国防大学。会议的主题是，交流军事运筹学教材，交流用运筹学理论和统筹学方法研究作战、训练、装备管理、作战模拟等方面的成果。

为了筹备好这次会议，决定由国防科技大学的刘德铭担任总协调人，本书作者当时担任秘书组组长，参加秘书组的还有：军事学院的康鹏、王常杰、李乃奎，国防科技大学校办秘书于炎，后勤学院的刘天禄，济南军区的浦再明等。

秘书组长带领国防科技大学军事运筹学教研室的几位年轻教员，在军事学院招待所，按照会议的议程，进行了全程模拟演练。于1985年11月15日，向学会理事会在京的理事汇报了会议筹备和模拟情况。具体地说，就是以下事项：

（1）关于会议的主题不变。

（2）如果在开会时，国防大学已经成立，就让刘天禄请国防大学校长在开幕式上讲话，如果国防大学还没有成立，就让康鹏请军事学院院长肖克在开幕式上讲话，请陈忠民副院长主持开幕式。

（3）会议的规模正式代表150人之内，出席开幕式的总人数控制在200人之内，正式代表中应该包括沈阳军区23军的苏宁等。

（4）会议代表自带会议论文，经过保密检查，打印170份。

（5）所有的论文一律交由国防科技大学的邱涤珊负责保管和分发，提前装入文件袋，登记造册存档备查，虽然每一篇论文通过了保密检查，单单一篇论文可以交流与传阅，但是整个的论文集与论文集目录不得外传，因为敌方可以从论文集的

宏观结构上，分析得出我军学术界关注的重点。

(6) 彭运森负责联系北京最著名的照相馆，请著名摄影师负责出席开幕式的全体人员合影，吴洪鳌负责参加合影人员的排座次。

(7) 徐培德负责到中国科学院接送许国志、桂湘云、越明义、董泽清、王建方等。

(8) 大会开幕式和主题报告之后，分 7 个组进行分组交流，每天下午 5 点贴出海报，公布第二天小组分组情况，此事由徐培德负责。

(9) 大会上所有的首长发言稿由余滨负责保管。

(10) 于炎负责邀请解放军报社的编辑黄华敏、黄连城，光明日报社记者张胜友。

(11) 所有要见报的文章、会议通讯和照片等，一律交由秘书组长组织审查通过。

(12) 秘书组长 24 小时吃住在秘书组办公室内，秘书组的所有工作人员必须 24 小时与秘书组长保持联系。

理事会通过了秘书组长拟订的工作计划。学术会议完全按照模拟的情景顺利召开，1985 年 12 月 1 日，《解放军报》头版头条，《光明日报》头版，刊登了会议的通讯，还配发了编者按。会议取得了圆满的成功。

通过这次会议，军事运筹学学会理事会提出的“军事运筹学”的内涵是“军事问题，定性定量，模型模拟，方案选优，辅助决策”，也得到了与会的领导机关首长和会议代表的普遍认同，进一步统一了认识，为军事运筹学在军内的普及和推广发挥了重要的作用。

[**例 6.4**] 抢险前计算堰塞湖面积

2008 年 5 月 12 日，汶川大地震以后，本书作者的一名研究生正在抗震救灾的现场，需要尽快计算出一个堰塞湖的面积、平均水深以及蓄水量。作者建议采用模拟的方法，依据堰塞湖所在区域地图，可以迅速计算出堰塞湖的面积。

一是称重量。将地图粘贴在 100m × 100m 的木板上，沿着湖的边界锯下来，分别称一下“整个地图木板”的重量，“堰塞湖木板”的重量，如“整个地图木板”重 1000g，“堰塞湖木板”重 400g，那么堰塞湖就是 $4000m^2$。

二是数格子。“整个地图”是 100 个格子，“堰塞湖”占据了 40 个格子，堰塞湖自然就是 $4000m^2$。

三是掷骰子。随机地说出 20 个 1 位数，如 1，5，5，2，3，4，1，7，5，8，6，7，6，8，8，1，9，2，3，3；依次每两个 1 位数，组成一个 2 位数，依次每两个 2 位数，组成平面上的一个点的坐标，得到 5 个坐标点：$A(15,52)$，$B(34,17)$，$C(58,67)$，$D(68,81)$，$E(92,33)$，如图 6.3 所示。

将这 5 个坐标点描在地图上，发现其中 2 个坐标点 A、C 落在堰塞湖内，另外 3

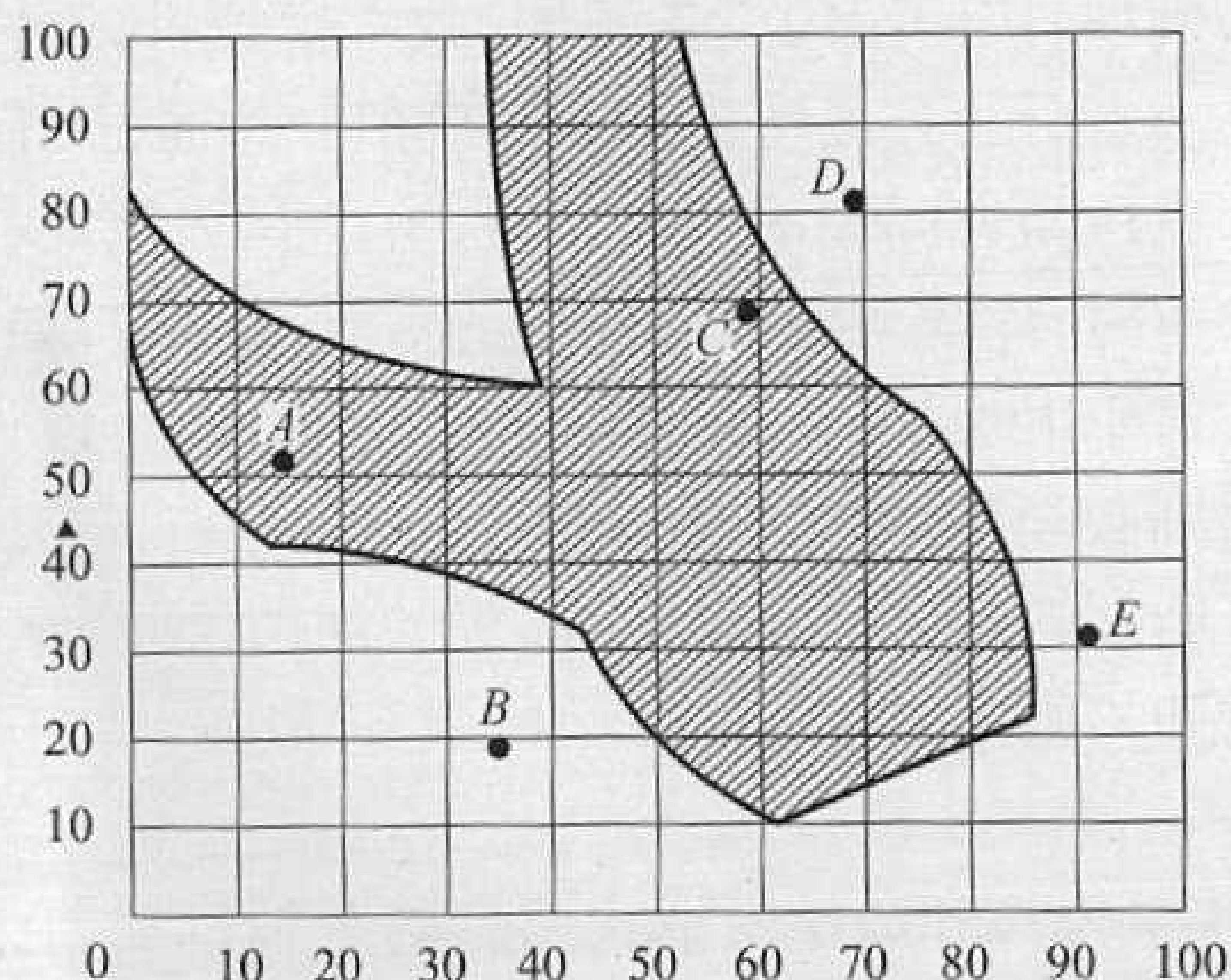


图 6.3 堰塞湖平面图

个坐标点不在堰塞湖内，于是可以认为堰塞湖的面积是 $4000m^2$。

以同样的方法可以测得堰塞湖的深度，如测量 A、C 的深度分别是 5m 和 7m，则可认为堰塞湖的平均深度是 6m，从而得知堰塞湖的蓄水量是 2.4 万 m^3。

6.2 系统模拟概述

模拟是在工程开发研究中最广泛使用的一种研究手段。就模拟的一般含义来说，模拟可以理解为通过模型推演去获得对被研究对象的认识。

这里先讨论对模拟的一般认识，然后再着重说明计算机的模拟。

6.2.1 系统模拟的分类

1. 实景模拟

这类模拟的特点是保持了现实世界时间和空间的直观性。像我们理解模型的性质一样，这里的直观性并不等于实际尺度。例如，实战演习、风洞实验、放大或缩小了的实体模型的实验等都属于这一类模拟。

2. 数学模拟

数学模拟是运用系统的数学模型进行实验（推演）来取得系统的认识。这类模拟不具有现实世界的时间和空间的直观，但是，选择和变换它们的尺度非常容易。与实景模拟比较，需要有更多的信息和深入的研究才能建立起数学模拟模型。但是，这种模拟实验既省工、省时、省钱，又具有极大的灵活性。因此，它越来越成为模拟的主要形式，尤其是大规模的、开发性的系统的研究，几乎都要大量地用数学模拟。

按照使用的工具来划分模拟类型，在具体工作中是很有用的，但是，在概念上

却遇到了很多困难，例如，按使用的设备不同，数学模拟可以分为模拟计算机模拟和数字计算机模拟，或者分为连续模拟和断续模拟。然而，从前面几节有关数学模型讨论中已经知道，就所研究问题的实质来看，有的是离散的、有的是连续的。然而，用数学描述和求解时，离散问题可用连续的数学来求解，如用兰切斯特方程求解两军格斗问题时，对于大规模（人或武器众多）战斗，就可以作常微分方程求解。而对于小规模战斗，则必须当作离散的随机问题来求解。同样，当我们从微观上研究物质分子的热运动时，这是一个离散的、随机的问题，而当从宏观上用物体的温度作为分子运动指标时，则可以用连续数学模型来描述。

3. 混合模拟

混合模拟是将实景模拟和数学模拟相结合的一种模拟，它用来解决一些复杂的，或者需要细致研究的某些问题。例如，研究武器系统的整体属性和研究制导系统就常常使用这种模拟。开发一个武器系统，需要通过在作战条件下的运用研究来确定它的一些重要整体特性，这些特性称之为战术技术性能。在进行这种模拟研究时，需要描述战斗运用过程的逻辑和方程，需要输入除武器的战术技术性能以外的很多数据，这些数据包括自然环境、目标、地形、威胁环境以及有关作战原则的数据。下面通过更细致一些的情况来阐述混合模拟的概念，图 6.4 为一种轰炸机执行战斗任务的过程示意图。

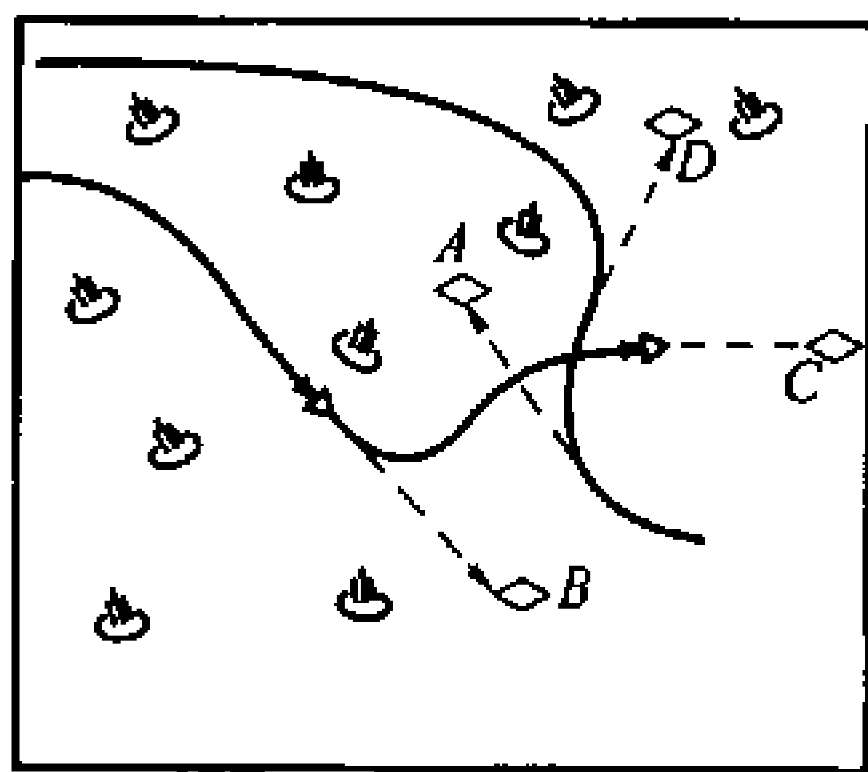


图 6.4　轰炸机执行战斗任务的示意图

首先设定其战斗任务是轰炸 A，B，C，D 等 4 个目标，并设定其典型的战斗环境（包括地形、敌方防空体系等），在此基础上展开战斗过程的逻辑研究。

接近目标的历程：飞行路线选择，经受敌方拦截的战斗过程。

战区活动：对目标的攻击方案，战斗动力学（战斗机动），战斗实施（活动和决策）。

对于接近目标历程的研究。由于在进入战区的巡航飞行中条件变化的意外性较小，而各种战斗中接近目标的方式大致相似，即输入数据和过程模型的统计性较好，因此，可以用数学模型来描述。

在战区活动中，对目标的攻击可由设定的典型环境和战斗条例通过数学模型

来预先制定方案，常常是制定几个，以使在飞机飞入战区后视当时的情况选择其中的一个方案。

对于战区活动的其他两个方面，则要把战斗原则和战区的多种可能发生的情况结合起来进行，无论从输入数据，还是从活动模型来看，都是极为复杂的。在目前情况下勉强用数学模型去做，就需要花费很多时间来编制极其复杂的程序，而且需要很大的计算设备，所得到的结果也还不一定满意，因为其中包含了相当多人的创造性活动。为此，最合适的办法是采用实景模拟，即把人的创造性活动直接引入，从而使数学模拟和实景模拟相结合，构成混合模拟。于是，上述问题的混合模拟的逻辑框如图 6.5 所示。

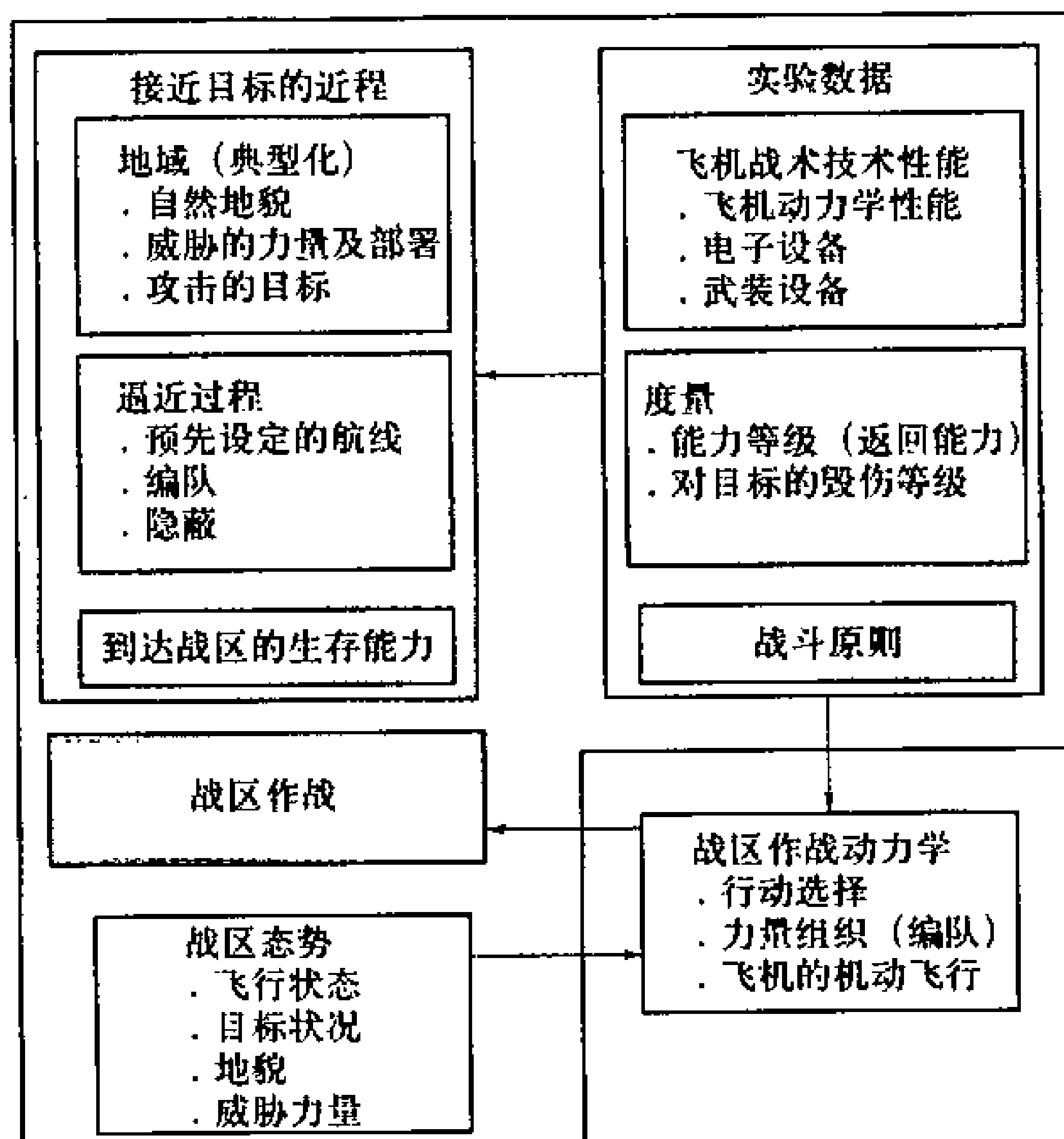


图 6.5 轰炸机任务混合模拟逻辑框图

图中在线框内的所有工作都是由计算机完成的，它们包括运用数据和进行模拟运算，而飞机的作战动力学状态和战斗过程状态的选择与转移是由人做出的，通过相应的设备（如战况显示、地形显示、驾驶模拟器、操作键盘等）与计算机进行交流（通信、对话）。

如果将这一模拟逻辑框进一步展开，就能得到所举例子的模拟实验程序。

6.2.2 模拟的实质

从以上的讨论可以看到，模拟就是用模型做实验。模拟方法不像数学求解方

法(如解析方法或数值方法)那样致力于直接寻求特定变量之间的关系,而是通过设计实验逻辑程序,用实验来观察各个变量随实验进展的变化情况,从而导出各变量之间的关系,以达到了解系统的目的。

因此,模拟实验最重要的是设计实验的逻辑程序,并制定实验规则和判断准则。

模拟和数值计算虽然都是在数字计算机上进行的,却有完全不同的概念,只要把握住模拟的实质,就可以正确地理解这两者之间的不同。

下面举一个市场模型的例子来说明它们之间的区别。

在线性假设下,市场模型可描述为

$$Q = a - bp$$
$$S = c + dp$$

求解的条件是

$$Q = S$$

式中 Q——需求量;

S——供应量;

p——价格,它常常被作为控制参数;

a,b,c,d——为系统结构参数,它们与 Q,S 表达式一起决定着市场系统的属性。

这个问题如果从数学观点来看,就是求解下列联立方程组:

$$\begin{cases} Q = a - bp \\ S = c + dp \\ Q = S \end{cases}$$

显然,这个问题是存在解析解的,而且容易找到它,即可按步骤进行。

如果要求数值解,可以令

$$p^* = \frac{a-c}{d+b}$$

$$Q = S = a - bp^* = c + dp^*$$

按下述步骤进行:

(1) 设定解的范围,给出一个数集(可用表达这一数集的各种形式);

(2) 选定一个 p 值代入 Q,S 式,求出 Q,S 值;

(3) 比较 Q,S,是否满足 $|Q-S| \leqslant \varepsilon$。此处 ε 为一指定的正数,作为 $Q \approx S$ 的判别准则;

(4) 当 $|Q-S| > \varepsilon$ 时,制定选取新的 p 值的规则。

从上可以看到,这样做能够给出在 a,b,c,d 的一组确定值下的数值解,但是却无法看到 a,b,c,d 与 Q,S 的影响,即系统结构对解的影响。

如果改用模拟方法求解,其步骤是:

(1) 设定一个初始实验输入值 p_0;

(2) 将 $p=p_0$ 代入 S,求出 S_0;

(3) 令 $Q=S_0$。代入 Q,求出 p_1;

(4) 用求出 p_1 代入 S,求出 S_1;

(5) 判别 $|p_1-p_0|\leqslant\varepsilon$,$\varepsilon$ 为一指定的正数。

将这个过程用流图来表示时,如图 6.6 所示。

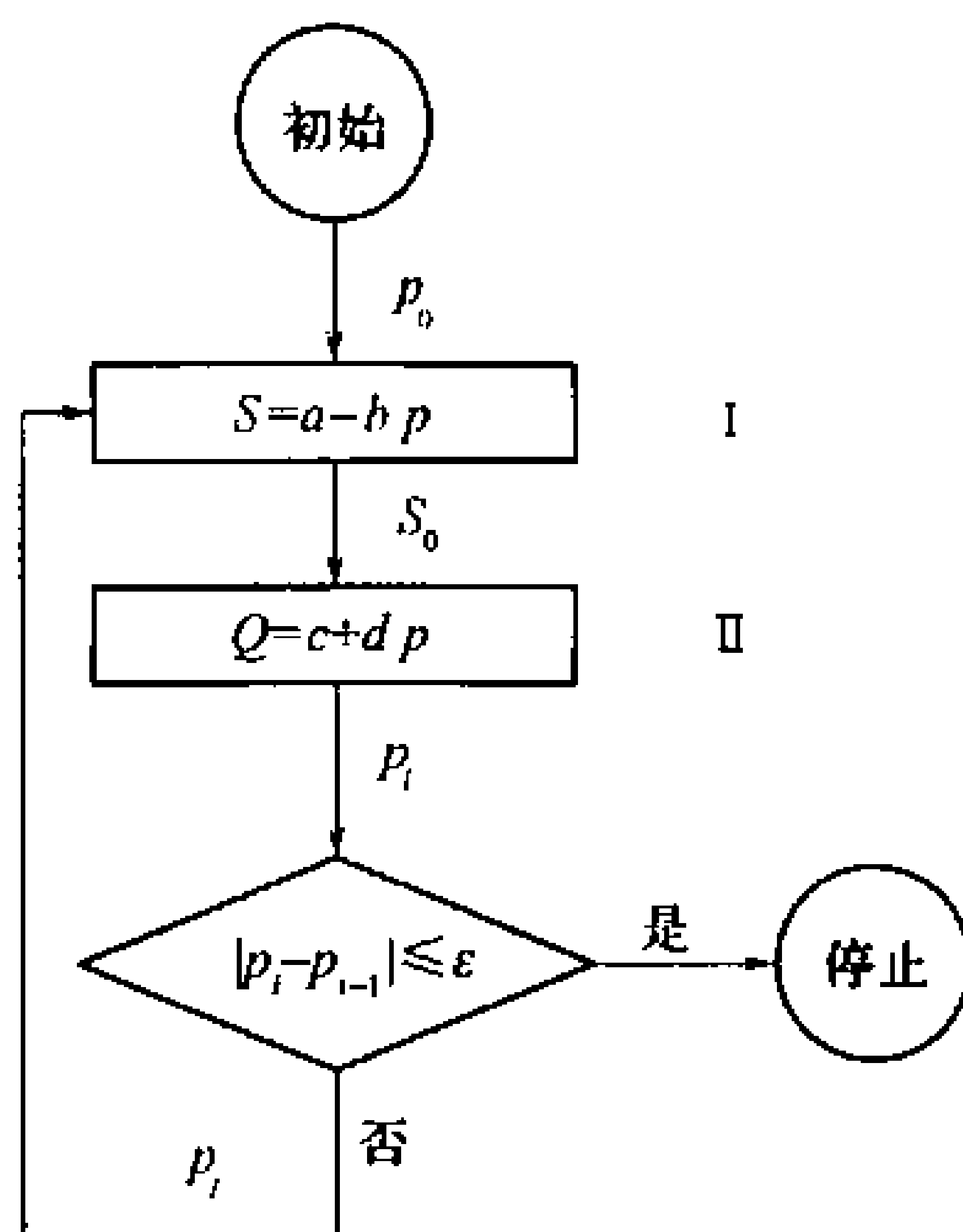


图 6.6 市场模型的模拟逻辑流图

从显示 Q,S 关系的平面图 6.6 上,可以清楚地观察到模拟实验的进程,从而通过它可以对系统取得更丰富的认识。例如,当 Q 的斜率在数值上大于 S 的斜率时,将发现 p 的数值是发散的,即按图 6.5 的逻辑流图作下去,p 值摆动越来越大,而不会向某确定值收敛,如图 6.7 所示。

这一过程表明,这时市场系统是不稳定的,当价格发生一些扰动,即受到干扰时,将引起市场的混乱。在 6.7 图中,Q 的斜率数值小于 S 的斜率数值时,系统是稳定的,即当价格发生扰动后,虽然也会引起供求关系的不平衡,但所发生的波动越来越小,最后趋于平衡状态。这个过程从图 6.8 看得更清楚。当系统不稳定时,Q,S 的交点所显示的是一个临界点。从数学求解观点来看,系统不稳定,并不是说不能求出所给模型的解(如果解存在)。

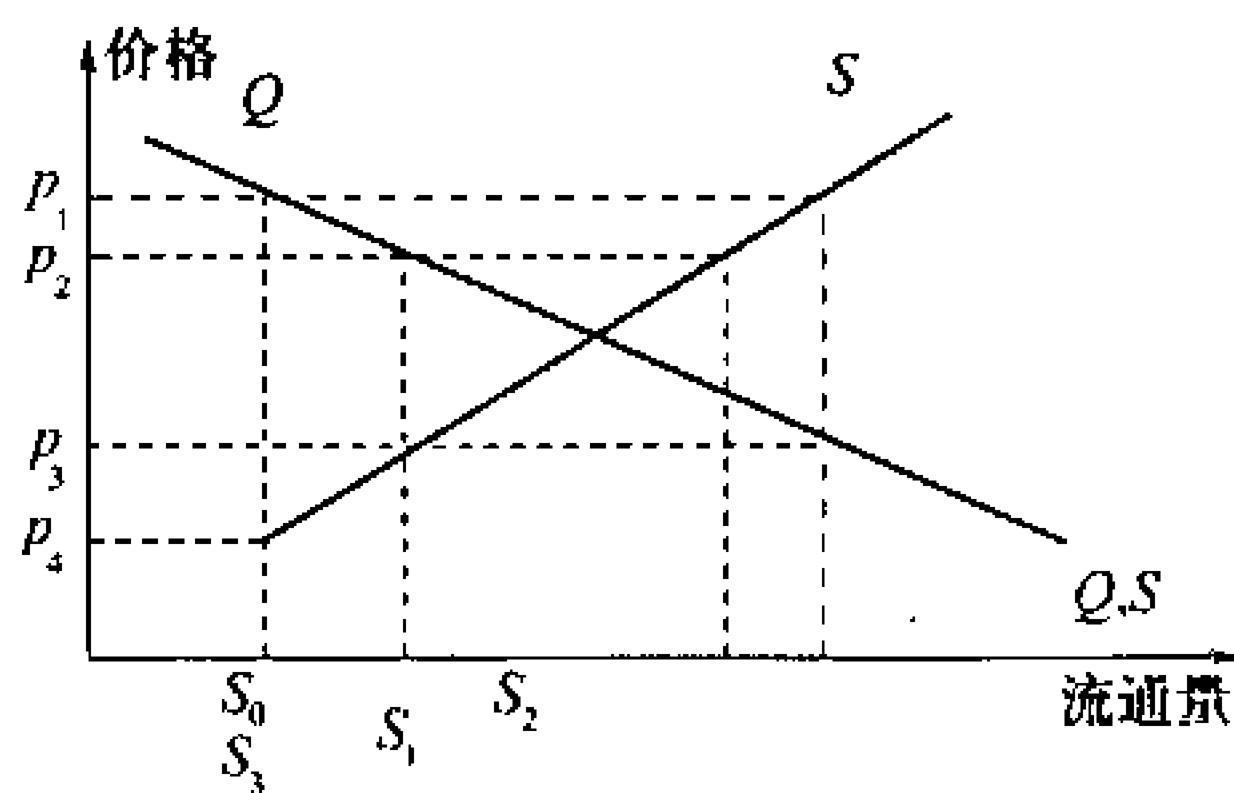


图 6.7 模拟进程形象图

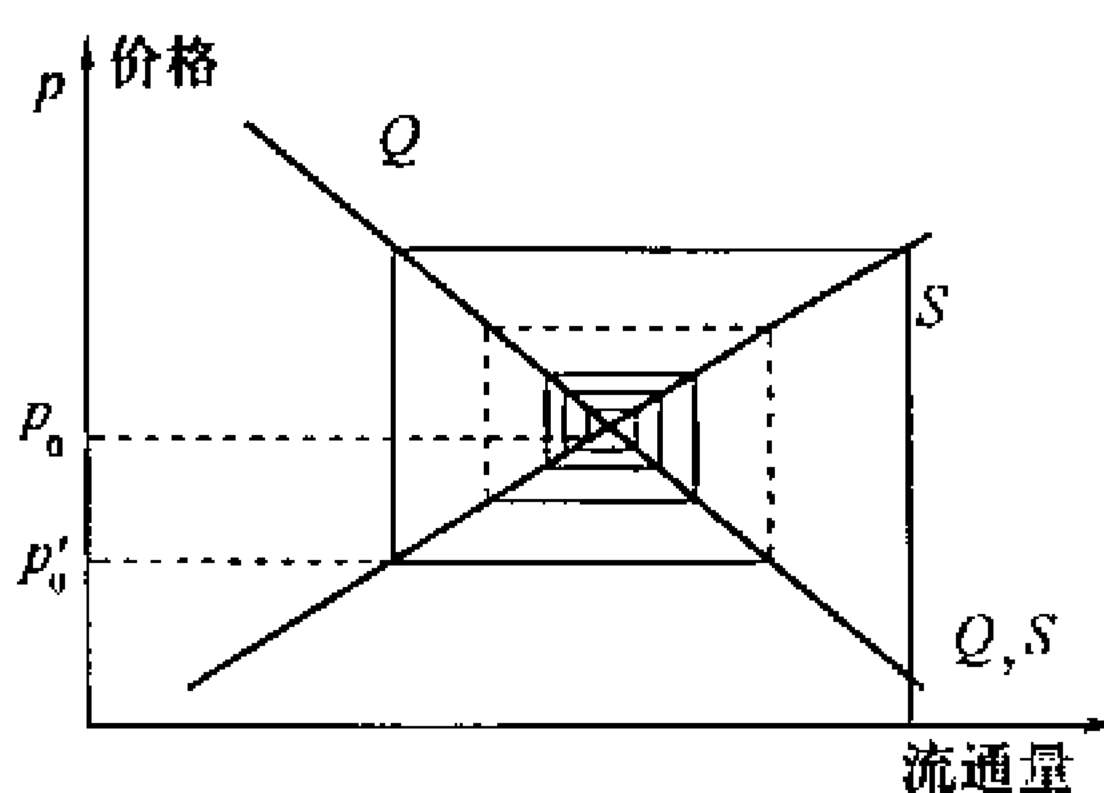


图 6.8 模拟进程形象图(不稳定情况)

如图 6.9 所示,当系统不稳定时,由随意选取的 p'_0 出发,先求出 p'_0 与 Q 的解,然后再逐步做下去,即颠倒一下图 6.6 所示的逻辑流图中 I,II 顺序,也求出问题的解,如图 6.10 的点画线所示。这样做虽然也把解求出来了,但是这种求解经历并不反映系统的性质,因为市场系统总是先有供应以后才能产生流通的,即价格的刺激是先通过供应而引起系统运动的。这个情况表明,模拟虽然也可作为一种

数值求解方法，但是它形象地显示出系统运动过程的实际性质，这一点是非常重要的。

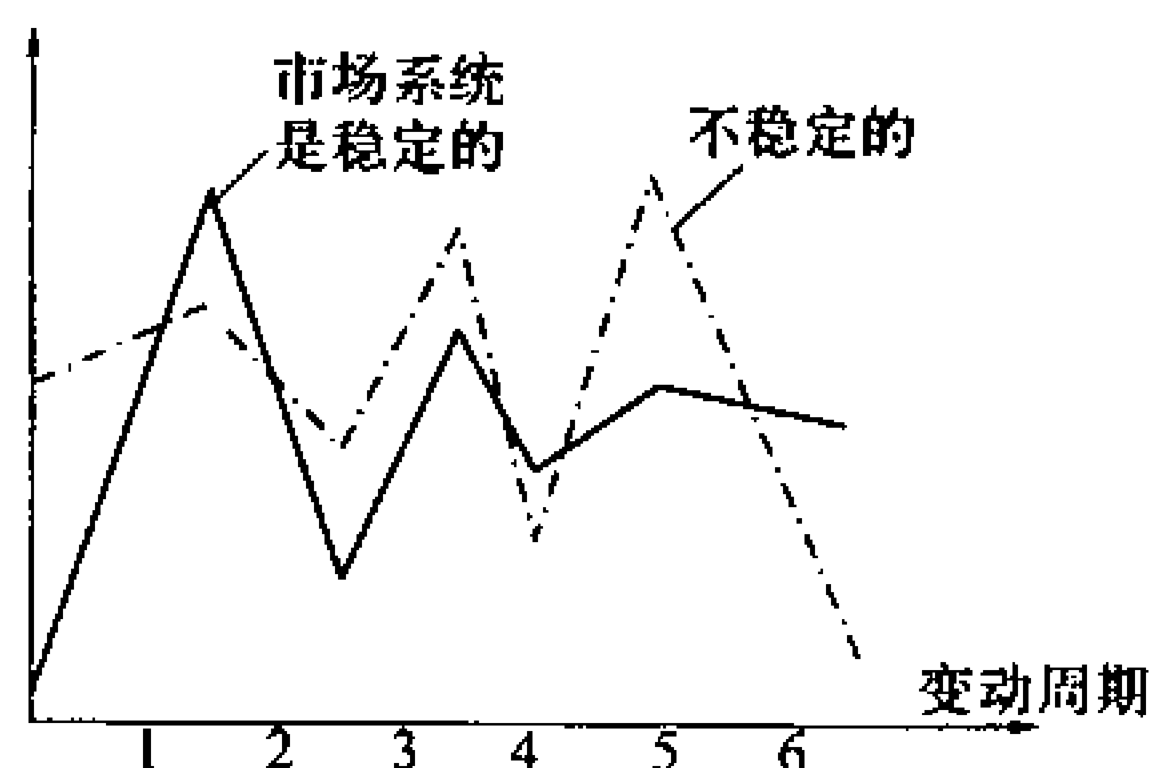


图 6.9　市场系统模拟经历的展开图

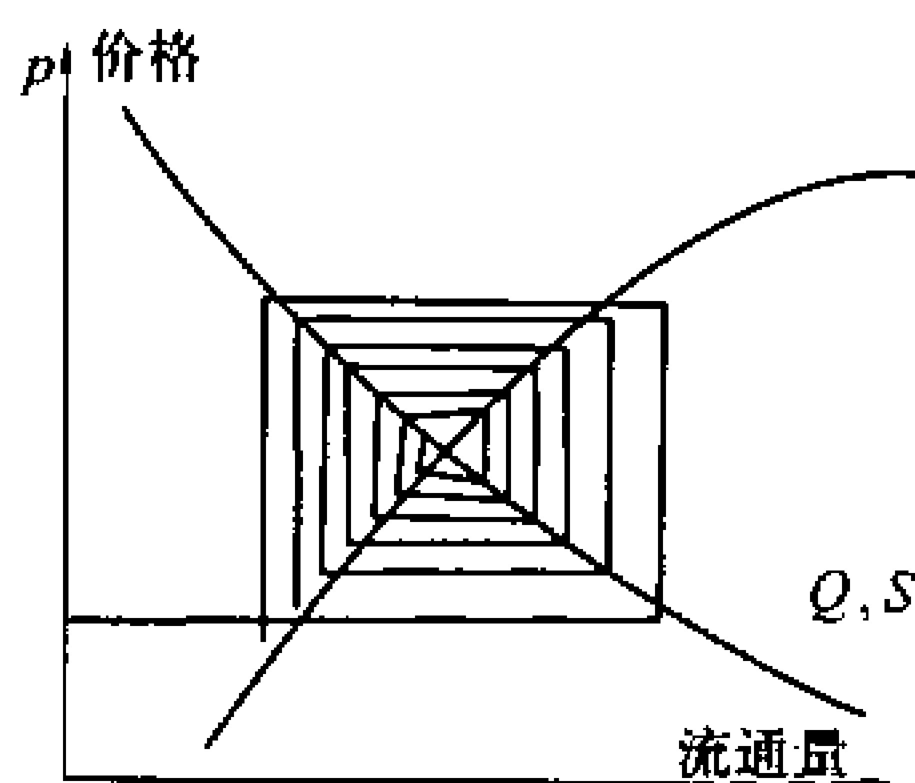


图 6.10　当 Q、S 为非线性时模拟的进程

当市场模型比较复杂，如 Q，S 都是非线性方程时，模拟方法的优越性就显得更加突出了。从图 6.10 中可以看到，这时不必去解复杂的非线性方程组就能找到解的。

6.2.3　蒙特卡洛法

蒙特卡洛法是一种特别的数值计算方法，这种方法基于随机取样实验。运用实验方法确定相应的概率与数学期望值来代替一系列复杂的分析计算。显然，这是在模拟意义下的一种方法，这种方法丰富了模拟的内容。

为了说明上述概念，我们来讨论下列积分的计算。

$$I = \int_0^1 f(x)\,\mathrm{d}x$$

假定函数 $f(x)$ 界于 0 与 1 之间，即当 $0 \leqslant x \leqslant 1$ 时，存在 $0 \leqslant f(x) \leqslant 1$。这一假定并没有对所需要做的积分计算附加任何限制条件，因此比例尺度是可以任意选择的。

做这个积分运算，就是要求出图 6.11 中由曲线 $f(x)$、x 轴、y 轴以及直线 $x = 1$ 为边界的域 G 的面积 S。

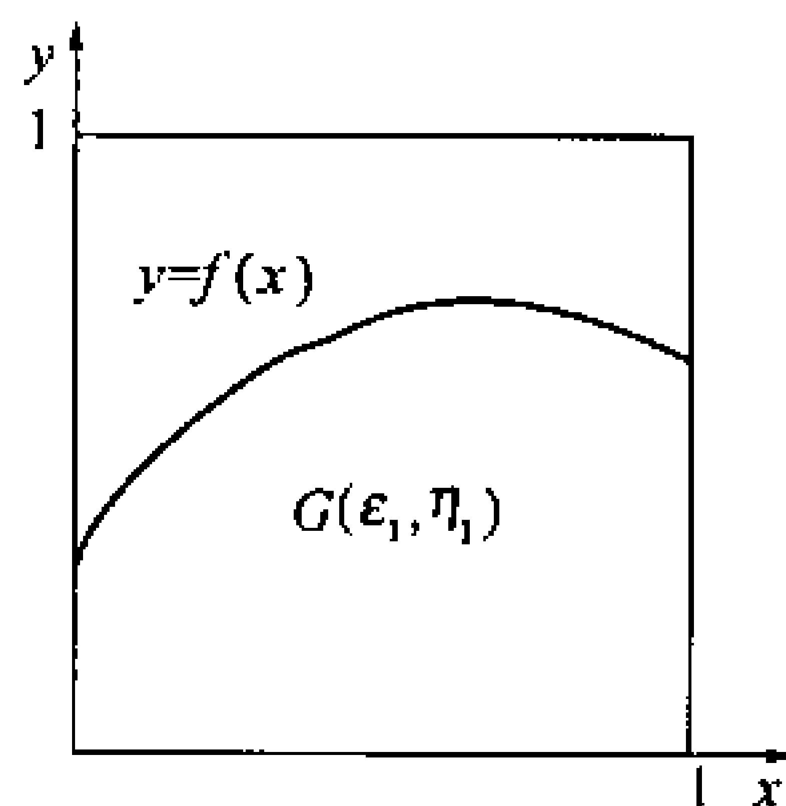


图 6.11　用蒙特卡洛法求积分

用蒙特卡洛法求解所列积分问题的概念是，如果投掷器每次投出的弹子都落在 $[0 \leqslant x \leqslant 1, 0 \leqslant y \leqslant 1]$ 的区间内，而且弹子的落点是相互独立和均匀分布的，那么弹子落在曲线下的面积 S 内的概率 p 将反映面积 S 与总面积之比，由于总面积为 1，所以，$p = S$。于是，可以使用这个投掷器做实验的办法来求解，实验的步骤如下：

(1) 投掷弹子，计算投掷的累计次数 n；

(2) 观察弹子的落点,设某次投掷落点为(ξ_i,μ_i);

(3) 判定弹子是否落在$f(x)$曲线下面,即是否存在$\mu_i < f(\xi_i)$;

(4) 计算弹子落入$f(x)$曲线下面的累计次数 m;

(5) 求出$p = \frac{m}{n}$;

(6) 判定实验的终止条件,常常是依据实验的结果来判断,对此,随后再作说明。

完成这个实验是在计算机上进行的,取一组(两个)随机数作为ξ和μ值,这就是投射弹子和观察其落点的过程。如果注意到做这种实验总是和分析问题的逻辑结构相联系,那么将会得到一个非常重要的认识,蒙特卡洛法是一个很有用的模拟手段,很适应于多维问题。

我们知道,只有当实验次数充分大时,概率特征才能与分析计算接近。这表现为对于随机事件的误差必须要认识到:第一,误差本身也是随机性的,与非随机性情况不同,不能断言其误差不大于某一指定值ε,只是意味着以多大的概率落入ε内;第二,要使精度增加一个量级,实验次数就要增加两个量级。因此,只有在高速计算机上才能现实地完成这一实验。除此以外,另一个解决问题的途径是,从数学方法上研究模型的加速收敛。

另外一类包含随机事件的问题,如粒子穿透问题、系统的可靠性问题、战斗过程、随机服务等,它们都可以用模拟方法有效地进行研究。

下面通过一个小实验来形象地了解模拟方法。设有一条通信线路,共有3条备用支线,其中第一条支线的接通概率为0.7,第二条为0.3,第三条为0.5,求这条通信线路接通的概率。

对于这一问题,可以很容易求出它的解析解为

$$p = 1 - \prod_{i=1}^{3}[1 - R_i] = 0.895$$

做实验时的步骤如下:

(1) 每次实验由3组构成。

(2) 用标有0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0的完全相同的圆球作为抽样系统。

(3) 由第一组开始,从经过充分混合的上述10个球中取出一个,若取出的球的标数小于或等于0.7就代表能够接通,即第一支线接通;反之,如果取出的球标数大于0.7,则表示第一支线不通,随后转人做第二组。显然,3组中任何一组接通后,随后的实验就无须再做多。

(4) 第二组的作法同(3),若取出的球的标数小于或等于0.3就代表能够接通,即第二支线接通;反之,如果取出的球标数大于0.3,则表示第二支线不通。第

二组做完后，转入做第三组，第三组作法也同(3)；若取出的球的标数小于或等于0.5就代表能够接通，即第三支线接通；反之，如果取出的球标数大于0.5，则表示第三支线不通。

(5) 3组都做完后，如果都不通，就表示这次实验不成功，即线路不通。

表6.1是此实验的结果。

表6.1 实验结果

实验次数	一组	二组	三组	是否接通
1	0.6			接通
2	0.8	0.5	0.6	
3	0.8	0.3		接通
4	0.9	0.4	0.4	接通
5	0.9	1.0	0.4	接通
6	0.1			接通
7	1.0	0.6	0.1	接通
8	0.1			接通
9	0.3			接通
10	0.1			接通
11	0.5			接通
12	1.0	0.2		接通
13	0.1			接通
14	0.3			接通
15	0.6			接通
16	0.3			接通
17	1.0	0.7	0.8	
18	1.0	0.8	0.7	
19	1.0	0.5	0.1	接通
20	0.6			接通

由表6.1得到接通的概率：

$$p^* = \frac{17}{20} = 0.85$$

模拟20次，就比较接近于0.895的计算值。要提高模拟的精度，需要增加模拟的次数，还要在随机数产生机理上下功夫，随机抽取圆球，对于简单情况是可行的，对于复杂问题，就必须借助计算机生成随机数。

6.3　系统动力学分析过程

系统动力学(system dynamics,SD)研究起源于美国麻省理工学院 Jay W. Forrester 教授的名著《工业动力学》。由于初期它主要应用于工业企业管理,故称为"工业动力学"后来,随着该学科的发展,其应用范围日益扩大,遍及经济社会等各类系统,故改称为系统动力学。系统动力学基于系统论,吸取了控制论、信息论的精髓,它几乎经历了与控制理论等系统科学分支并行发展的过程。

系统动力学从研究系统的内部结构入手,通过把信息反馈的控制原理与因果关系的逻辑分析结合起来,建立系统仿真模型,并对模型实施各种不同的政策方案,通过计算机仿真展示系统的宏观行为,寻求解决复杂问题的正确途径。系统动力学针对实际系统中存在的问题,从系统的整体观出发,充分估计和研究其影响因素,不回避其复杂性,特别注重研究系统内部的非线性相互作用、协同以及延迟效应等问题。系统动力学模型,是从问题的确定开始,然后通过识别与问题紧密相联的系统边界,描绘主要变量的因果关系图,建立系统流程图并转化为系统动力学方程组,最后再利用计算机求解并分析评价,为决策者提供政策建议。系统动力学的主要步骤如图 6.12 所示。

下面介绍系统动力学的分析过程。

1. 问题辨识与定义

1）建模的目标

问题辨识是进行系统动力学建模的首要阶段,也是模型成功与否的先决条件,要明确建模目的和主要问题及其假设条件,确定系统的边界,并对问题涉及的主要变量进行动态定义。

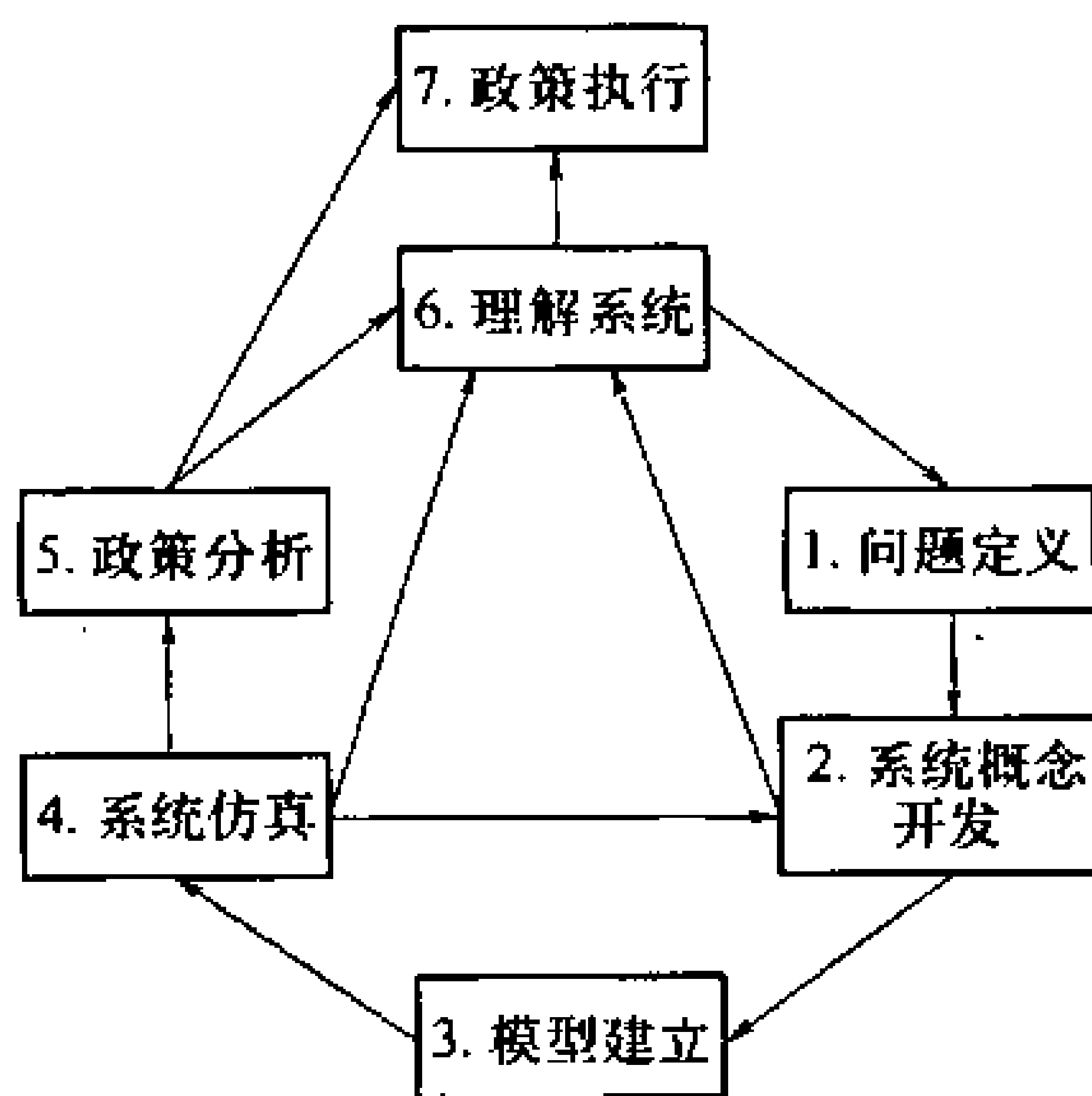


图 6.12　系统动力学的步骤

2）系统边界设定

系统边界是指系统的范围,它规定了形成某特定动态行为所应包含的最小数量单元。边界内为系统本身,而边界外围是与系统有关的环境。系统边界是一个想象的轮廓,它应包括形成某种特定动态行为所包含的最小数量单元。

2. 系统概念与结构开发

在问题辨识和变量定义之后,应进行系统概念和结构的开发。系统动力学认为,系统的功能是由系统的结构决定的,把握系统规律必须从系统结构入手,从系统论的观点看,结构就是单元的秩序,它包含了两层意思,一是指组成系统的各单

元，二是指诸单元间的作用与关系。系统的结构标志着系统构成的特征。

3. 因果关系图

在分析了系统结构以后，为了进一步表示系统主要变量之间以及主要变量与其他变量之间的相互关系，为建模提供基础，按照构造特点，对系统内部的要素及其关系进行分析，确定系统中影响问题的因果反馈结构，通过因果关系图将其表示出来，并对其进行了描述。

系统动力学认为，复杂系统的基本结构是反馈回路，它是系统内部若干元素的因果链相串联而形成的一条闭合回路。用箭头表示系统内部两元素之间的因果关系就是因果链，因果关系的特性就是因果链的极性，用正负号表示，由于元素之间的相互关系非常复杂，在确定因果链极性时，要设定其他所有影响变量保持不变。

1）反馈系统

反馈系统一般分为两类：正反馈系统和负反馈系统。从系统的行为来看，负反馈系统会自动寻找目标，在达不到目标时会产生偏差响应。例如，如果我们把手表和人看成一个系统，人可以观察手表是否准确，不准确则进行调整，该系统以标准时间为目标，它是一个负反馈系统。而正反馈系统会产生增长的过程，在此过程中，过去行动所产生的结果会引起未来更大的行动。例如，在图 6.13 所示的工业系统中，如果把产值通过利润留成形成自有资金作为该系统的要素，该系统就是一个正反馈系统。

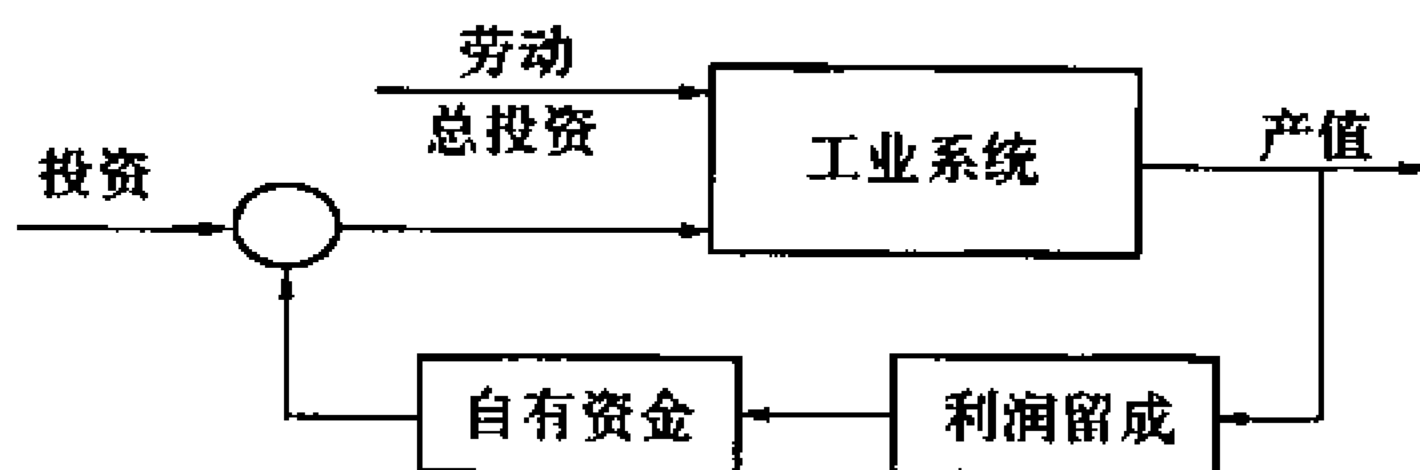


图 6.13　反馈工业系统示意图

2）系统的因果关系

因果关系，表示两个因素（变量）之间的作用关系，是对两个因素（变量）产生的原因和结果之间的分析，即分析哪个变量是“因”，哪个变量是“果”，以及“因”对“果”是产生正的作用还是负的作用。因果关系是构成所研究的系统内部各因素之间影响的机制，是建立系统动力学模型的基础。

（1）因果关系的表示。在系统动力学中，系统的因素（变量）用圆圈表示，中间标以变量名称或符号，因果关系用一个箭头表示。图 6.14 表示，人口出生率与人口总数以及治理工程与污染量的因果关系。这样的因果关系图有时称为影响图，又称为有向图[2]。

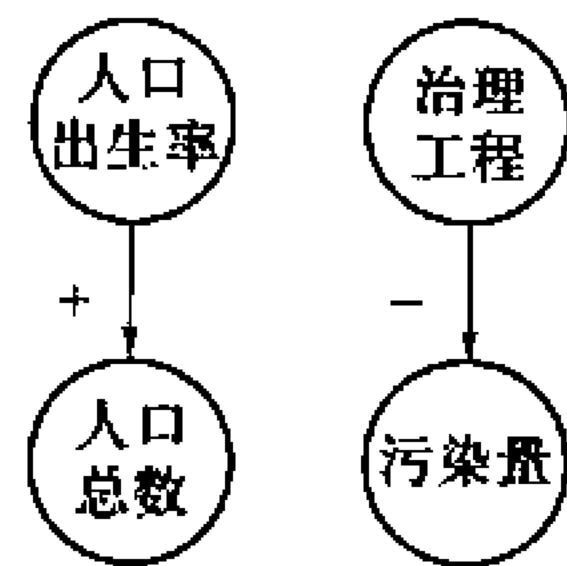


图 6.14　因果关系表示图

（2）因果关系的反馈环：两个以上的因果关系链首

尾串联而形成封闭的环路,称为因果关系反馈环。为了确定反馈环的正负,我们只须记住以下规则:①各链极性都为"+"时,该环为正反馈环;②各链极性中出现偶数个"-"时,该环为正反馈环;③各链极性中出现奇数个"-"时,该环为负反馈环。将因果关系图称为有向图时,则正反馈环称为正回路,负反馈环称为负回路。

图6.15是彩电供求中的因果关系图[3]。投入生产量—销售量—社会拥有量—社会需求量—生产计划—投入生产量形成的负反馈环,由社会拥有量控制投入生产量,使系统处于不过剩不缺货的稳定状态。

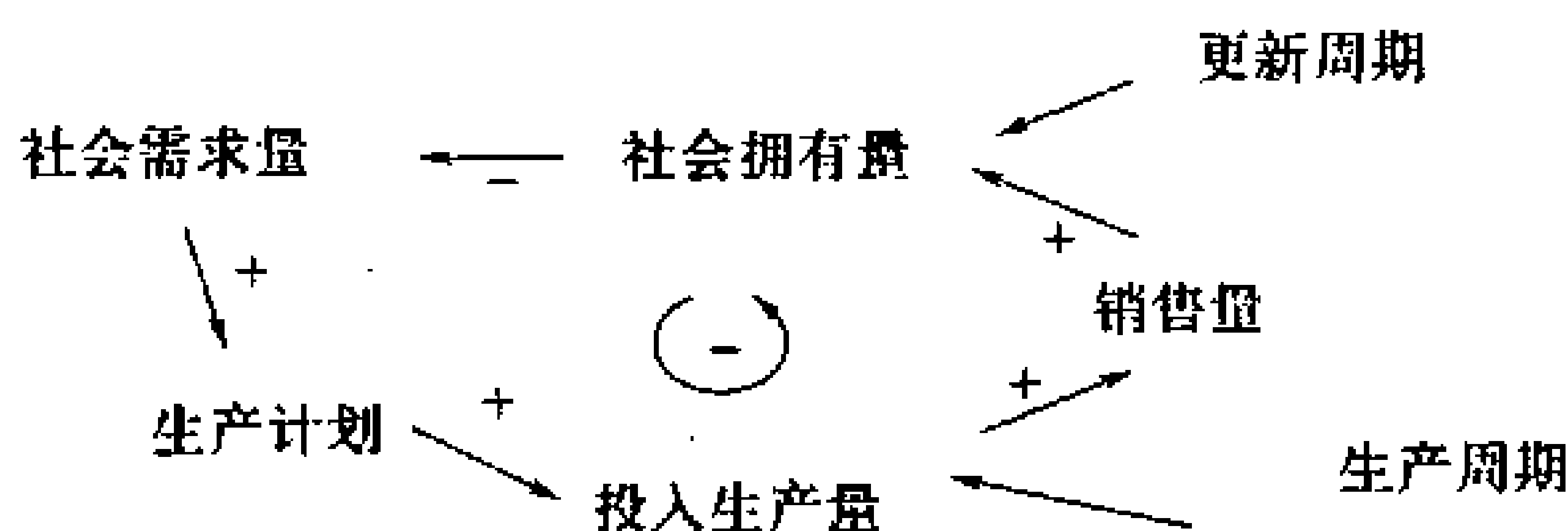


图6.15 彩电供求因果关系负反馈环示意图

产品的售后服务是决定市场占有量的重要因素,于是彩电生产厂家决定从销售利润中拿出一定比例的资金进行售后服务,以争取更多的买主。图6.16是产品售后服务与利润的因果关系图,是利润—售后服务—客户满意度—销售量—利润形成的正反馈环。

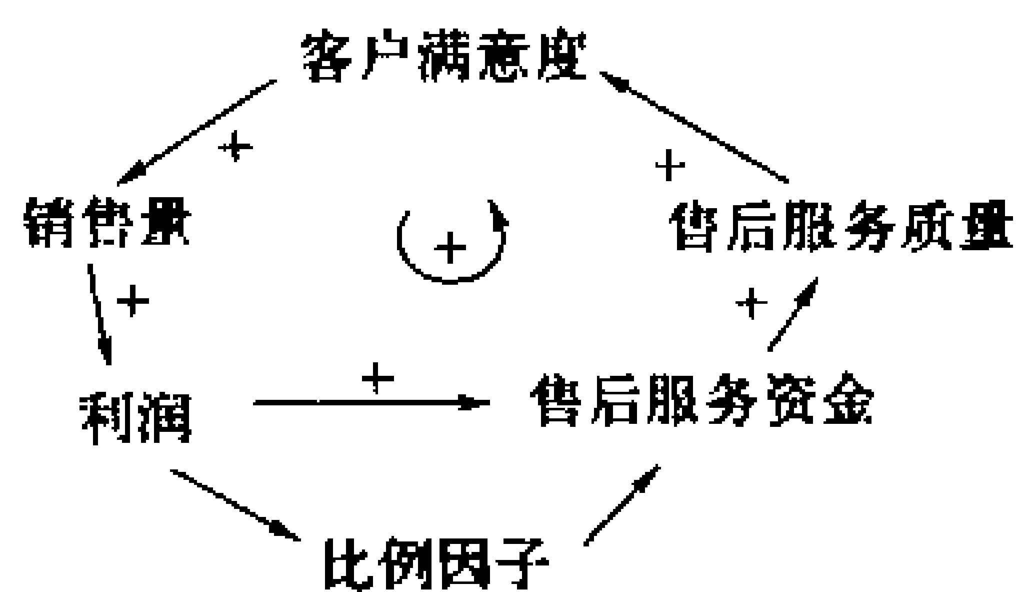


图6.16 售后服务与利润因果关系正反馈环示意图

值得注意的是,一个复杂系统,往往是由若干个正反馈、负反馈环相互耦合形成的复杂结构。在这样的系统中,由于正反馈环的自我强化作用和负反馈环的自我调节作用,使得系统呈现出"增长"与"稳定"之间相互转化的行为。例如图6.17,由于用于售后服务的资金多,尽管客户满意程度越来越高,吸引新客户或老客户更新的购买欲望,但客户总是有限的,因此销售量总趋于稳定,随之利润也趋于稳定。

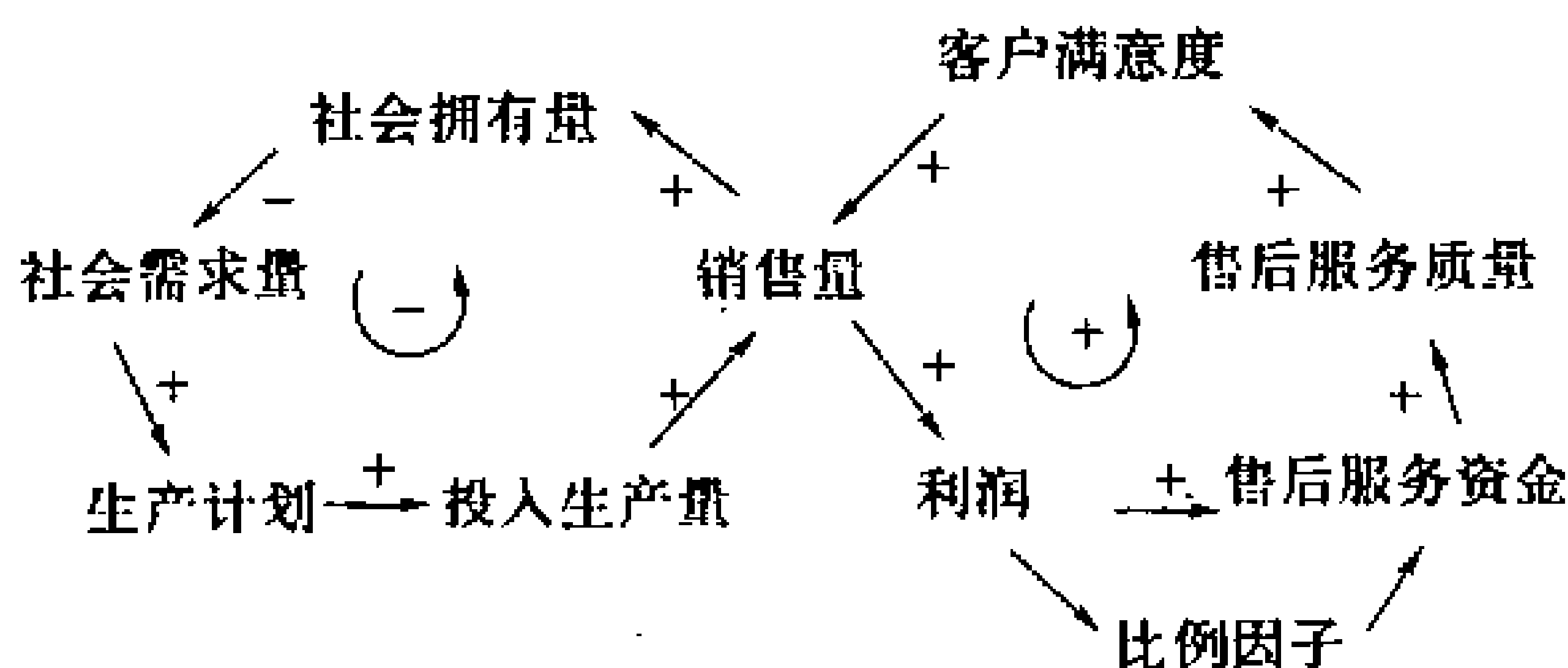


图6.17 彩电销售因果关系反馈图

通过对系统的反馈回路与因果关系的分析,有助于对系统进行模拟研究。

参考文献

[1] 赫伯特·爱德华. 论真理[M]. 周玄毅,译. 武汉:武汉大学出版社,2006.

[2] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.

[3] 王可定. 计算机模拟及其应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1997.

[4] 汪定伟,王俊伟,等. 智能优化方法[M]. 北京:高等教育出版社,2007.

[5] 曾宪钊. 军事最优化新方法[M]. 北京:军事科学院出版社,2005.

[6] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[7] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[8] 陈国良,王煦法,等. 遗传算法及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2001.

[9] 程索萍,陈庆华. 武器装备采办管理组织结构的 Petri 网建模与分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2000(6).

[10] 罗小明,周威. 系统动力学方法及其在武器装备体系作战效能评估中的应用[C]. 军事系统工程委员会第十一届学术年会论文集,北京:军事科学出版社,2001.

[11] 李明,等. 武器装备发展系统论证方法与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[12] 李明,刘澎,等. 武器装备发展系统论证方法与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2000.

[13] 刘兴堂,梁炳成,刘力,等. 复杂系统建模理论、方法与技术[M]. 北京:科学出版社,2008.

[14] 苏懋康. 系统动力学原理及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1988.

[15] 王惠刚,陈志群,等. 计算机仿真原理及应用[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1994.

[16] 赵全仁,等. 武器装备论证导论[M]. 北京:兵器工业出版社,1998.

[17] 周威,常显奇. 系统动力学基本理论仿真平台的开发与应用[J]. 指挥技术学院学报,2001(3).

第7章　系统评价

为了在众多可互相替代的方案中做出正确的选择，需要有足够的信息，其中包括足够的评价信息。所以说，系统评价只有与方案决策和行为决定结合起来才有意义。评价为了决策，而决策需要评价，评价过程也是决策过程。“评价”与“决策”有时候可以作为同义词使用。在实际问题上由于评价与决策的目的不同，两者仍有区别。在本章中首先分析四个例子，然后重点讨论系统评价的一般原理与基础方法。

7.1　实　　例

［例7.1］　资源城市的替代产品问题

1988年12月8日，新疆克拉玛依油田指挥部的一位领导专程到湖南长沙，邀请国防科技大学七系的系统工程专家们到克拉玛依油田，为他们谋划油田的发展问题。在系主任沙钰的带领下，方舵、卢锡城、胡晓峰、谷德敏、李希平以及本书作者等一行七人，先由长沙坐火车到广州，又乘坐广州飞往乌鲁木齐的飞机，再从乌鲁木齐出发，乘坐一辆越野汽车，冒着狂风暴雪和零下18℃的严寒，汽车轮子上捆绑着铁链子，花费了14h，才到达克拉玛依市。

当时，克拉玛依油田确有许多问题亟待解决，从管理决策优化来说，就有很多实际问题，诸如场站的布局优化问题，原油运输道路的优化问题，输油管道巡查员检查线路的优化问题，作业区内的钻井顺序及转点路线优化问题，等等。

在7天的时间里，系统工程小组成员们参观了克拉玛依油田的若干个重要下属单位，从系统工程的角度，帮助研究解决了一些管理决策优化问题。

在离开前，油田指挥部举行座谈会，油田指挥部的各有关部门的领导都出席了座谈会。座谈会上，系统工程小组成员们提出了一个问题，想请油田指挥部的领导同志考虑，油田资源枯竭后，少则10年，或者20年，城市怎么发展，创下的这份家业怎么办？这就涉及如何评价一个决策班子的战略谋划能力。这一提问，使得会议气氛立即热闹起来，陆续有同志发言，汇总起来大约有三种意见：

(1) 像玉门油田那样，发现了新油田，哪里需要哪里安家，打起背包就出发。

(2) 希望在南疆或其他地方又发现了大油田，以克拉玛依为依托，开发新疆的

其他油田。

（3）学习新疆建设兵团，分流部分人员从阿尔泰山脚下饮水，发展农业，开荒种地。

关于第三种方案，油田指挥部曾邀请北京某著名大学的专家来考察过，专家认为阿尔泰山的积雪仅够用 100 年，费很大的财力、物力、人力建设引水渠道，不合算。

系统工程小组根据几天来的参观考察的情况，针对油田指挥部提出的三种方案，谈了如下几点意见。

（1）石油资源枯竭的生存问题，需要尽快作为战略研究课题尽快立项研究，尽快找到解决方案。

（2）目前克拉玛依市与克拉玛依油田指挥部是一套指挥班子，这是历史形成的，从保证石油生产来说，有其优越性，但从城市稳步发展来说，有一定问题，应积极向上级反映，能够分开最好。

（3）作为克拉玛依市，人口达到 10 万，不能采取“打起背包就出发”的战略，石油作为城市的支柱企业，继续为城市稳定发展作贡献，但城市应尽早考虑石油资源枯竭后的替代产业，尽快培育非油产业，争取在 10 年左右时间形成规模，最好能使非油产业与石油产业在 10 年后达到平分天下的地位，如果是这样，就为今后克拉玛依市的生存与发展奠定了基础。

（4）从阿尔泰山下引流雪水灌溉农田，应该是一个不错的选择。至于积雪仅够 100 年用的结论是不准确的，用目前积雪厚度除以每年流下来的水量，可能也是这个估计，但是阿尔泰山南麓的每年降水很大，降水与流下来的雪溶水基本上处于某种平衡状态。阿尔泰山的降雨是因为从从东南方向来的暖湿气流在随着山势上升过程中遇到了从北方来的干冷气流，在两种气流的接触过程中形成了降雨，只要阿尔泰山还在，只要地球上的气候不发生大的突变，阿尔泰山的降雨不会发生大的变化。而且随着云贵川桂地区多阶水电站的开发，东南方向的暖湿气流沿着终南山北侧向西北方向的流动会得到加强，很有可能使得该地区的降水量增强。因此，修建从阿尔泰山引水的工程有着长远的利益，可以考虑采用地下暗渠的方式，以减少地面蒸发。只要完成了这项大的引水工程，就为解决克拉玛依的后续发展创造了更大的空间。

（5）克拉玛依地区有着丰富的旅游资源，如黑油山，也就是维吾尔语的“克拉”“玛依”，传说一位维族老汉，牵着毛驴从一个黑色小山包上带了“黑油”，运到乌鲁木齐市的达贵人家，供人取暖使用。后来被地质勘探人员发现，从而有了著名的克拉玛依油田。不管这是真实的故事，还是美丽的传说，以这个主题，建一个更大的公园，吸引世界各地的人来参观旅游。只要搞得好，仅旅游一项就可以享誉天下。见图 7.1。

城市广场

黑油山

水库

克拉玛依油田

图 7.1　现在的克拉玛依

［例 7.2］　怀柔山区发展问题

20 世纪 90 年代后期，北京市与当时国防科工委开展了军民共建项目，国防科工委派出由国防科技大学七系从善本教授牵头的系统工程小组为北京市房山区的经济发展进行了规划论证。当时本书作者也积极向怀柔县有关领导建议，加强战略研究，积极开展经济社会长远发展规划研究。当时从国家科技部调到怀柔县的一位县委领导对此非常感兴趣，热情邀请国防科技大学的系统工程人员来到怀柔，共同讨论课题研究的思路。系统工程专家建议，将房山县城迁到交通要道的良乡镇，还建议怀柔县将住在北部山区的永久居民逐步迁移到以怀柔县城为中心的怀柔县南部平原地区。这样一来，不仅使国家关于山区贫困户的脱贫、孩子们的义务教育等方面的投入发挥更大的效益，而且退耕还草、还林、还水，有利于生态恢复。

县委领导同志认为，方案虽然好，但困难也不少；主要问题，一是迁移到南部平原四镇：城关镇、庙城镇、杨宋镇、雁栖镇的住宅建设问题；二是移民后的生产依托和生活来源问题。系统工程专家认为这两个问题可以通过政府、旅游公司、房地产公司等各方参加的旅游开发来解决。在平原地区建设民宅，在山区建设旅游风景区，通过旅游开发，不仅为建设民宅提供了资金，而且为安置山区劳动力提供平台。失去劳动力的居民长期在平原地区居住，学龄儿童在平原地区接受义务教育，具备劳动能力的青壮年以旅游风景区员工的身份负责管理山区的旅游项目，保护生态环境，如图 7.2 所示。

随着人类活动的加剧和生态环境资源的过度开发，保护生态、保护环境变得刻不容缓，多少年来怀柔北部山区的林、草、溪、虫、鸟、兽等构成的天然协调的相互依存的自然环境，不要轻易破坏，不要刻意建设单一功能的开发区。一句话，应保持

图 7.2　北京市怀柔区地图

好原生态，地形、气候、生态、地质灾害之间存在的复杂因果关系，人们还没有完全认识到。

［**例 7.3**］　住房分配问题

背景介绍：某部门为解决机关干部住房，建设完成了 4 栋楼房作为经济适用房出售。某部门有退休干部 180 人，在职干部 317 人。房子建好以后，迟迟分配不下去，主要的意见分歧是：有的退休干部希望所有人员大排队，按照打分多少依次排队选房，另外还有的希望修改排队打分办法；有的在职干部反映这可能是最后一批经济适用房，将来大家都会退休，应该统筹兼顾，平衡退休干部与在职干部的利益。为了研究解决这一问题，营房管理部门提出了一个“建议方案”：排队打分办法不应再修改，拟将 4 栋楼房划分成两部分进行分配，其中一座板楼 A 与一座塔楼 B 分配给退休干部，另外两座板楼 C、D 分配给在职干部。

在这种情况下，营房管理部门遵照首长的指示，派出人员征询本书作者的意见。作者通过查阅有关资料，基本掌握了矛盾的焦点，提出以下看法，如图 7.3 所示。

（1）目前全军各单位在分配住房时所采用的各种排队打分办法，都存在一定的弊端，在分配住房中遇到的问题分歧主要原因在此，诸如军龄分、工龄分、学龄分、上山下乡分等，还有立功加分，获奖加分，在本单位的工作年限加分，双军人加分等，矛盾比较突出。

作者建议，统一采取基本工资的多少作为排队标准是简单可行的，即工资条中

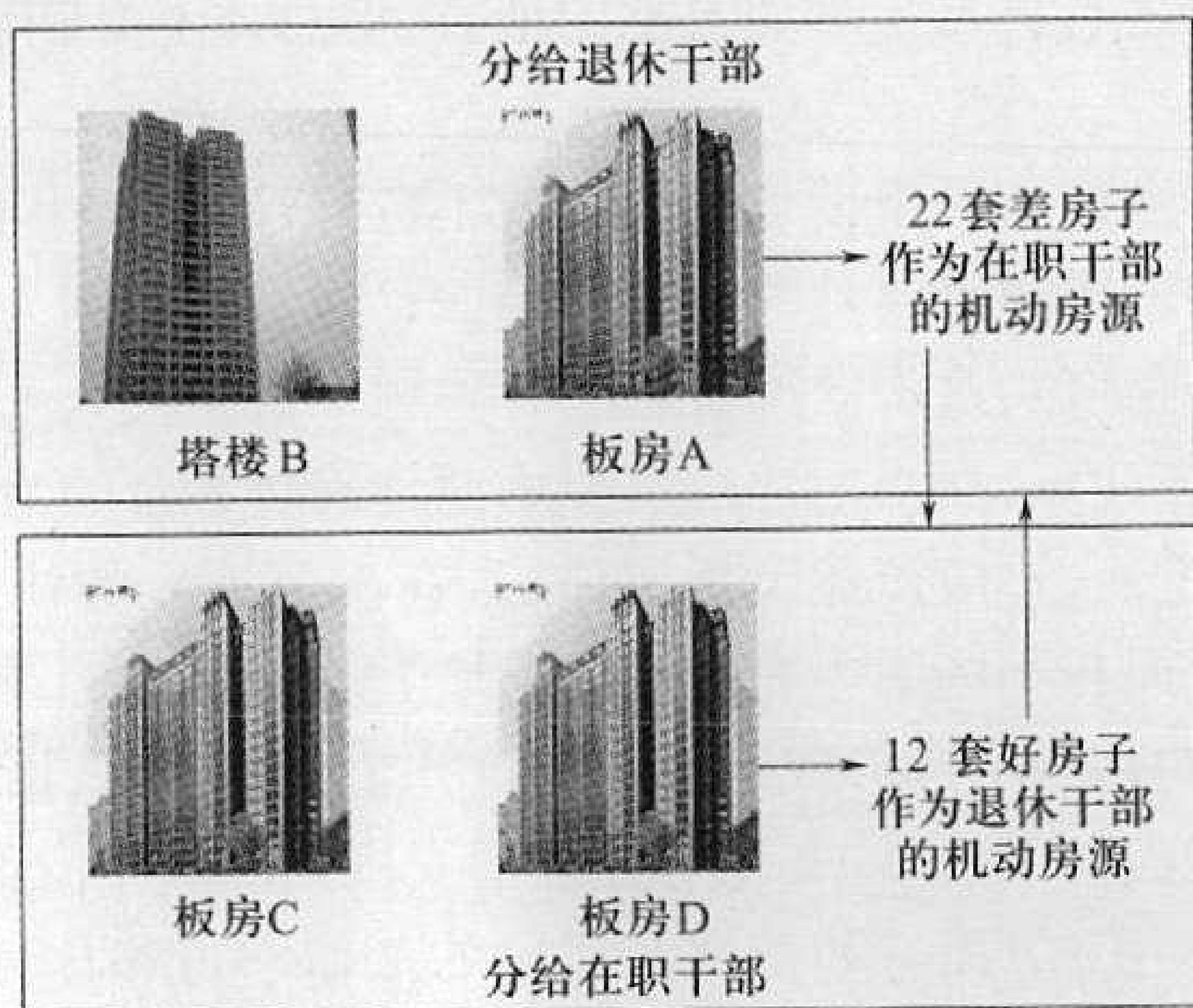


图 7.3　分配计划

的前三项:职务级别档次、军衔高低档次、军龄工龄学龄等,将前三项除以 10,取整数,作为一名申请住房者的排队分;师团职干部大致在 500 分 ~900 分之间。

(2) 既然该部门分配住房的排队打分办法已经沿用多年,在新办法出台前,建议继续沿用,不做任何修改。

(3) 对于退休干部与在职干部,应该将房源划块分配,统筹兼顾,板房 A 与塔楼 B 分配给退休干部,板楼 C、D 分配给在职干部,总体上是可行的。

(4) 对于退休干部与在职干部,应分别计算,在划块的房源中,好的房源占全部房源的百分数应该大体一致。

(5) 对于退休干部与在职干部,应分别都有一定的机动房源,机动房源的数量占申请住房人数中的百分数应该大体一致。

综合以上看法,建议:

退休干部划块为:塔楼 B;板楼 A,但需从板楼 A 中切去 22 套低楼层的房源给在职干部作为机动房源;另外从板楼 D 中切去 12 套采光好的房源给退休干部作为机动房源。

在职干部划块为:板楼 C;板楼 D,但需从板楼 D 中切去 12 套采光好的房源给退休干部作为中机动房源,另外将板楼 A 中切来 22 套低楼层的房源给在职干部作为机动房源。

计算两个百分比如下:

180 户退休干部中,有 163 户分到好房子,好房子的比例为 90.5%;

317 名在职干部中,有 286 户分到好房子,好房子的比例为 90.02%;

为 180 名退休干部留出机动房 12 户,机动房的比例占退休干部的 6.67%;

为 317 名在职干部留出机动房 22 户,机动房的比例占在职干部的 7%。

这一方案，尽管还有许多不尽如人意的地方，但总体上是朝着统筹兼顾的方向努力的。

本书作者建议，允许有的申请住房者这次不选房，以后如果有下一批经济适用房分配，这次不选房的申请者自然应该排在前面；当然，如果因为各种原因，下一批经济适用房没能及时到位，这次放弃者也应有思想准备。

另外本书作者还建议，在当前北京房源用地越来越紧张的情况下，在六环之内不应该建设花园别墅区，不应该建设低层住房，在一个独立的住房小区内，楼房应分布在小区的周边，而在小区的中央位置建设地下停车场，地下停车场的地面上建设社区会馆。邻近的几个小区形成社区功能较齐全的服务区，诸如幼儿园、九年制教育学校、商场、医院、老人公寓、文化与社区治安机构等。一方面可以减少城市主干街道的交通压力；另一方面有利于社区居民的工作学习和休息。内城区交通拥堵的原因，大多归罪于车多路窄，其实停车场太少，立交的道路太少，阻断道路的大院太多，行政公务车辆太多，可能是最主要的原因。

上面谈到依据工资排队的情况，排队顺序具有稳定性。也就是说工资的结构调整和增加，从总体上说，不会影响排队顺序。"从外部说，动态地讲，连长的工资应是刚参加工作的小学老师的3倍；从内部说，静态地讲，在军内系统，每提高4个级别，工资翻倍。"例如，从外部讲，当小学老师的月薪是30元时，连长的月薪为90元；当小学老师的月薪是1000元时，连长的月薪为3000元。从内部讲，当连长的月薪为3000元时，团长的月薪为6000元，军长的月薪为12000元。这样，就可以将军人工资的调整常态化、制度化。

[例7.4] 经济适用房装修

2005年后，单位为解决干部的住房，在奥运村公园附近建造了一批经济适用房。建成的经济适用房都是毛坯房，需要购房者自己进行室内装修。一时间，大大小小的家装公司与施工队挤满了洽谈的现场。如何装修呢，本书作者给自己规划了一个路线图：室内应是什么式样的总体布局？总的装修费用应控制在什么水平上？与哪家装修公司或施工队签订合同？如何保障装修的进度与质量？本书作者认为，前两个问题是必须首先确定下来的，因为请装修队时，这两个问题必须明确，但是当时心里并没有底数。时间一天天地过去，各家装修工程进展得非常迅速，就这样过去了一个多月，作者才开始启动，到已经进入装修尾声的十余家装修现场，参观学习。各家的房主们一个个激动地介绍自己的装修风格和各种创意，当然也有装修不满意的，诉说着各种不愉快的经历。根据参观学习的情况，确定了自己喜欢的风格和总体布局，最深刻的体会是家装最忌讳"花样繁多"，最注重"简洁明快"，也就是结构简单，清洁明亮。这样一来，也大体确定了"120m^2 使用面积的家装总投入"不超过10万元。这两个问题确定以后，作者邀请了5个都具有公司背景的家装施工队的工长，请每个施工队的工长在两周内给提供一个预算表，实际上

是施工的材料购置地点价格明细表，给每个施工队的工长提前支付2000元劳务费，如果某个施工队提供的预算更符合实际，那么家装任务就由他承担，然后签订合同。两周后的一个双休日，作者租了一辆面包车，请5个施工队的工长到相关建材市场核对工长们在“预算表”中注明的施工材料购置的地点价格，只需随机地走访几家建材市场，就基本上确定哪个工长报价比较符合实际，比较讲诚信。随即拍板，留下准备聘请的家装施工队，不被邀请的家装施工队也不让他们退还劳务费，因为他们也确实付出了劳动。

紧接着就要签订合同，在签订合同时，必须明确自始至终地坚持住一条，房主的目标是“房主自身的效益最大化”，包括“牵涉房主的精力尽可能地少”，“投资金额尽可能地少”，“装修质量尽可能地好”，“装修工期尽可能地短”。房主经常犯的错误是，房主的目标经常会自觉不自觉地发生偏移。例如有一次，作者见到正在忙于装修的老同事，看到他非常憔悴的样子，问他为什么这样憔悴，他说他要每天亲自跑建材市场，亲自去购买建材，建材买得多，就有优惠，不能让优惠被工长占去。作者问他，设想这样一种情况，建材市场上的强化木地板，每平方米82元，你亲自去买，可能能降至每平方米72元，但是让工长去买，由于他施工时间长，讨价还价的经验丰富，与建材市场又熟悉，还可能具有许多优惠的信用卡，这些优胜条件加在一起，可能每平方米只需52元，如果他对你说给你买的材料每平方米62元，他瞒着你从中每平方米赚了你10元，你干不干呢？这位同事说：“我不干，为什么让他白白赚我钱，$100m^2$ 就是1000元啊！”作者说，啊呀！问题出在这里，房主的目标发生偏移了，房主的目标始终应该是自身的效益最大化，而不是施工队的效益最小化。房主和施工队是“利益共同体”，是“合作伙伴”，房主必须和施工队联合起来，共同向建材市场索取效益，把蛋糕做大，自身就可以获得更大的效益。

作者与施工工长签订合同的基本依据就是工长给提供的“预算表”，用什么材料，什么规格型号，在哪个建材市场能购买到，单位报价是多少，整体优惠打折如何，具有什么样的售后服务和索赔，全都清清楚楚，房主只需按时间节点检查验收就可以了。

房主必须清楚地知道，施工队给你装修一套房子，他要从中获得的效益是有底线的。如果你对施工队太“苛刻”，计算得太“精细”，施工队从你这里没有获得他事先预计的效益，他就会在“偷工减料”方面下功夫。例如，尽管你的毛坯房的厕所已经做过“防水试验与处理”，可是他向你建议，你需要再支付5000元，重新做一次“防水试验与处理”，这时你只能采纳他的建议，尽管他知道你的厕所真的不需要再重新做一次“防水试验与处理”，并且知道并不需要再花费5000元。但是，如果你不同意他的建议，你的房子基本装修完成以后，厕所一定是漏水了。施工队会给你列举多个理由，说明当时建议做“防水试验与处理”的必要性，而且责任在于你。事到如此，你必须请施工队从头做“防水试验与处理”了，花费就不再是

5000 元,而是 15000 元,可是施工队心里清楚得很,问题出在什么地方。

虽然作者的装修开工之日比其他同事晚了 50 天,但是只用了 40 天就顺利完成了,工期压缩了 1/2,总投资额控制在 10 万元之内,与多数同事相比,总投资降低了 1/3 以上。参观过作者的家装现场的同事们都说"简洁明快"、"赏心悦目"。通过这个实例可以认为,在项目管理中,利益攸关的决策者,通过优化,可以使得质量有保障,工期压缩 1/2,投资额降低 1/3。一个利益非有关的决策者,如果没有制度约束,没有便于操作的评价机制,不去优化管理,拖工期、降质量、涨投资的现象,就不是偶然的了。

7.2 系统评价概述

系统评价是系统工程中复杂而又重要的一个工作环节。问题解决得如何或者解决问题的方案和方法哪个更优,都依赖于系统评价。评价的目的是为了决策,系统评价是选优和决策基础,评价的好坏影响着决策的正确性。

7.2.1 系统评价的概念

1. 评价、评估、评比[2-5]

1) 评价

评价是指人们把握世界、事物、事件等对自己的价值的观念性活动,即以人的需要为尺度对已有的客体(人或事物)做出价值判断。评价是人类发现价值、揭示价值的一种根本方法。通俗地讲,评价就是依照一定的价值标准,对评价对象的质量、水平、效益及其社会意义进行价值判断。评价所反映的是评价对象的若干属性及其对人的需要的意义。它不同于认识、认知,但以认识、认知为前提。评价的基本特征如表 7.1 所列。

表 7.1 评价的基本特征

评价对象	可能产生价值效果的人或事物 具有系统性
评价依据	具有社会性
评价方法	定量与定性的统一 要用实验、调查、观察的方法获取客观资料,又要用推理性的统计分析等方法做出判断

评价可根据评价的范围可分为整体性评价、局部性评价及单项评价;根据评价标准的参照体系可分为相对评价、绝对评价、个体内差异评价;根据评价资料的处理方法和评价结果表示形式可分为定性评价(软评价)与定量评价(硬评价)。

2）评估

评估是对人或事物的价值做出评量与估价。相对评价而言，评估的严格程度和准确性要低一些，含有揣度、推测和估量的成分，其结论具有笼统性。通常采用非实验的方法，收集主观的资料和描述性的统计分析进行。但它同样追求评价结果的客观性、全面性和评价结论的可靠性。

3）评比

评比一词在《现代汉语词典》的解释是“通过比较，评定高低”。

4）评价、评估、评比的相互联系与区别

（1）从评价、评估、评比结论的准确程度看，评估往往是一种模糊的估量，其结论带有概略性、预测性；评价是对现存的人或已经发生的事的价值进行测量，其结论通常比较准确；评比是在评估和评价基础上，对若干个评比对象进行排序，其结论的准确性取决于评估、评价结论的准确性。

（2）从评价、评估、评比对象的范围看，评估通常是对单个对象或多个对象的整体进行的，评比必须在两个以上对象中进行，而评价既可以是对单个对象，也可以是对多个对象进行。

2. 系统价值

1）价值

价值是指客体与主体需要的关系，即客体满足人的需要的关系。当客体满足了主体的需要时，客体对主体而言是有价值的；当客体部分地满足了主体的需要时，客体对于主体而言具有部分价值；当客体不能满足主体需要时，客体对主体是无价值的；当客体尚未满足主体的需要，但却具有满足主体需要的可能时，客体对主体具有潜在的价值；当客体尚未损害主体的利益，但有可能损害主体时，它对主体具有潜在的危险，即潜在的负价值。

2）系统价值

系统价值是指系统的效果和目标的达成度。系统价值有两个特点：

（1）相对性。由于系统总是存在于一定的环境条件下，而评价主体在评价时的立场、观点、环境和目的等均有所不同，对价值评定也就会有所不同，即使对同一评价主体来说，随着时间的推移，对同一评价对象的评价值也会发生变化，因此造成了系统价值的相对性。

（2）可分性。系统价值包括许多组成因素，即价值因素。就设备系统而言，其价值要素主要有：性能、生产率、寿命、可靠性、适应性、节能性、可维修性和外观等。它们共同的决定着系统的总价值。因此，在系统评价时，通过对系统价值作合理的划分，将系统的价值进行多个方面的衡量与评价。

价值、评价、选择三者之间有着十分密切的关系。人类活动是一种对象性活动，也是一种有目的的活动，或者讲是一种具有选择性特点的活动。评价是人们了

解和揭示已有价值关系的最重要手段，价值是人们做出各种选择的客观根据，评价结论是人们做出各种选择的主观根据。选择都是基于一定的评价而做出的，它是评价的外化或现实化，改变选择也往往以改变评价结论为前提。

3. 系统评价

系统评价，就是评定系统的价值。具体地说，它是根据预定的系统目的，利用模型和各种资料，从系统整体出发，依照技术、经济、社会和环境等方面要求，对比各种可行方案，评定出系统的价值，为系统选优和决策提供依据。

7.2.2 系统评价的步骤

系统评价的逻辑框架由评价的逻辑起点、逻辑线索、逻辑终点以及逻辑线索上的各个节点组成。评价设计的逻辑起点是系统评价的具体指向，也就是系统评价的目标，从这一逻辑起点出发，向逻辑终点挺进的运动轨迹就是系统评价的逻辑线索，并随着具体评价目标的调整而改变。系统评价的基本逻辑框架如图 7.4 所示。逻辑线索上的每一个步骤就是一个逻辑节点，如设计系统评价指标，它与逻辑起点和逻辑终点的距离长短代表了已经完成和尚未完成的评价步骤的多少。

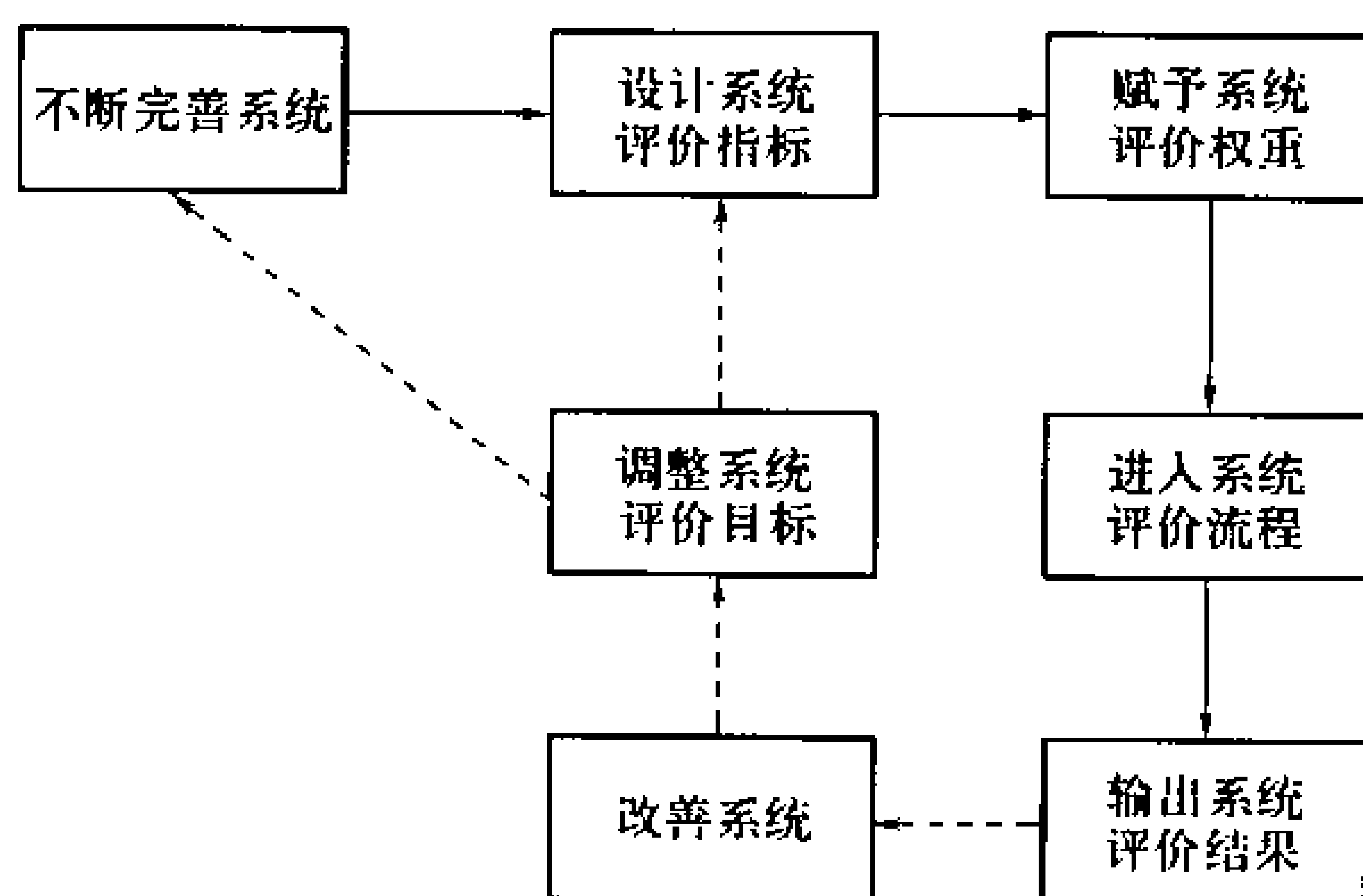


图 7.4 系统评价逻辑框架

从广义评价看，系统评价应以评价反馈即系统的调整“改善系统”作为逻辑终点，而严格地讲，它却是一个没有明确终点的循环系统，周而复始，以至无穷。从狭义评价看，系统评价有一个逻辑终点，即“输出系统评价的结果”，它是整个评价活动的成果总结，代表了评价活动在逻辑上的终结。

下面从狭义的评价理解，介绍系统评价的具体步骤，如图 7.5 所示[2]。

1. 明确评价的目的

评价目的决定整个评价工作的方向，即使相同的评价对象也可能有不同的评价目的。为了进行科学的评价，必须反复调查了解建立这个评价的目的以及为完成系统目的所考虑的具体事项。系统评价的目的是为系统提供重要的决策支持，

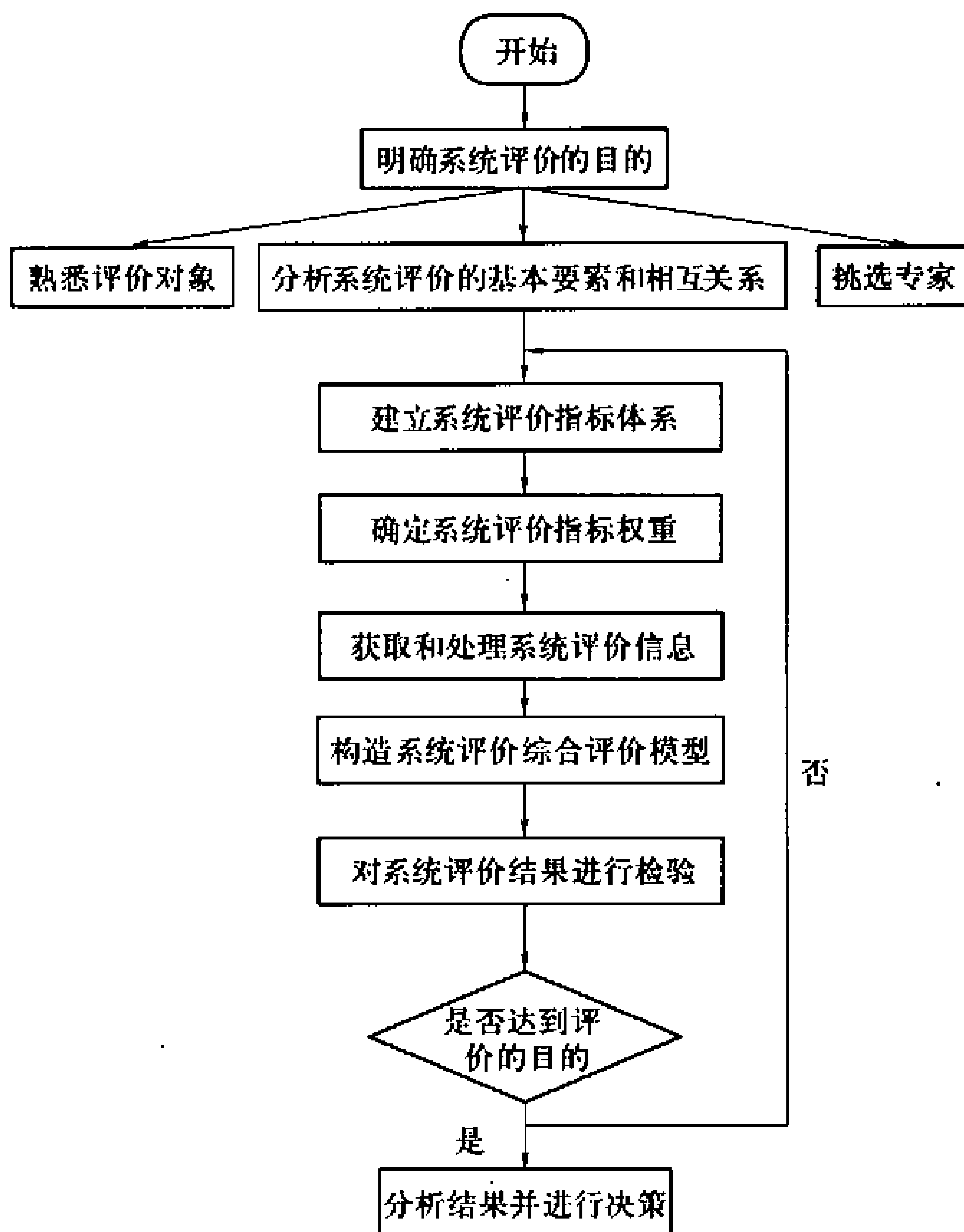


图 7.5　系统评价的具体步骤

使之能够及时准确地掌握系统现状，并对系统中可能出现的薄弱环节有一个总体上的认识和把握，为系统优化提供重要的参考依据。

2. 分析基本要素和相互关系

根据评价对象，收集相关的资料和数据，对组成系统的各个要素及系统的性能特征进行全面分析，并深入了解各要素的关系。

3. 熟悉评价对象

对评价对象熟悉的程度直接决定了评价的效果，了解被评价对象，收集被评价对象的有关情报资料，熟悉系统的行为、功能、特点以及有关属性，并分析这些属性的重要程度，其次要了解人们对系统的期望，了解人们的价值观念，即了解系统的环境。

4. 挑选专家

挑选专家时，在保证一定数量的基础上，既要注意专家的合理构成，又要注意专家的素质，挑选那些真正熟悉对象的内行专家，切忌只考虑专家的名望。

5. 建立评价指标体系

评价指标是衡量系统总体目标的具体标志。要对系统进行评价，就必须建立能对各种影响因素进行衡量的统一的尺度，即评价指标体系。评价指标体系是对评价对象进行评价的重要基础和依据。

6. 确定权重

评价的构成要素有主次和轻重缓急之分，各项评价指标对系统的贡献和重要程度也有所区别。为了准确、合理、直观的表达各个评价指标在评价的重要程度和作用大小，必须对评价指标体系中的每个评价指标赋予权重。

7. 获取与处理评价信息

对系统进行评价，其实质是依据给定的尺子去衡量系统，而直接被放到这把尺子上度量的是反映评价的评价信息。在获取大量信息的基础上，还需要对各种形式的评价信息进行科学的处理，否则无法纳入统一的数学模型进行计算。

8. 构造综合评价模型

建立评价数学模型的功能是将系统各属性的功能综合成被评价系统的总的功能。建模者要根据专家对评价指标体系的意见，选择和创造合适的数学表示方法，要了解不同数学表示方法的物理含义，切勿随意选择和创造表示方法。

9. 评价与分析

对系统评价结果进行检验以判别所选评价模型、有关指标标准、有关权重，甚至指标体系的合理与否，如果不合理则需要重新进行评价。

10. 选优，提交决策

由于评价指标体系和评价模型中不可能包含系统内所有的东西，另外，系统环境的变化、决策者的生存环境和心态的变化，也可能导致最优方案在实施过程中遇到困难，所以应对评价对象的结果进行综合考虑，以便提供正确的决策依据。

7.3 系统评价的指标体系

7.3.1 评价指标体系的概念

1. 目标、指标、标准[3-5]

人们在日常生活和工作中，把目标、指标、标准相互混淆的现象是经常遇到的。目标、指标、标准三者之间确有相互联系，但它们之间的区别也是显著的。

（1）目标。《现代汉语词典》[6]对目标的解释是：“想要达到的境地或标准。”可见，目标是人们行为的一种指向，且需要人们为之奋斗才能达到或实现的。因此，目标通常比较原则、抽象、笼统；目标描绘的往往是事物的要求。

(2) 指标。每一个指标是目标的一个方面或规定性的体现它能反映出目标的局部特征，使目标实现更加具体化、可操作化。

(3) 标准。系统评价标准，就是对评价对象的各项指标达到要求的程度，在数量和质量方面进行价值判断的准则和尺度。评价标准既包括定量评价的准则，也包括非量化的定性评价准则。

(4) 目标、指标、标准三者之间的关系。目标决定指标的存在，不存在没有目标的指标，离开了目标，指标就没有存在的意义；指标决定目标的具体落实，没有指标的目标，人们就很难认识目标和实现目标；目标反映事物的全部，指标反映事物的局部；目标总是比较稳定，而指标在反映目标的前提下，往往因时空、条件的变化而有所变动。标准是对指标达到程度的具体区分，是从数量和质量上具体衡量指标的尺度；指标是制定标准的依据和前提；指标是对评价对象提出的原则要求，标准是对指标所提要求的细化及等级划分。每个目标包含了若干个指标，指标又有若干个标准作支撑；目标、指标、标准都是相对概念，在一定条件下相互转化；从目标到标准是层次递进关系，是从宏观到微观的细化过程。目标、指标、标准三者之间的结构关系如图7.6所示。

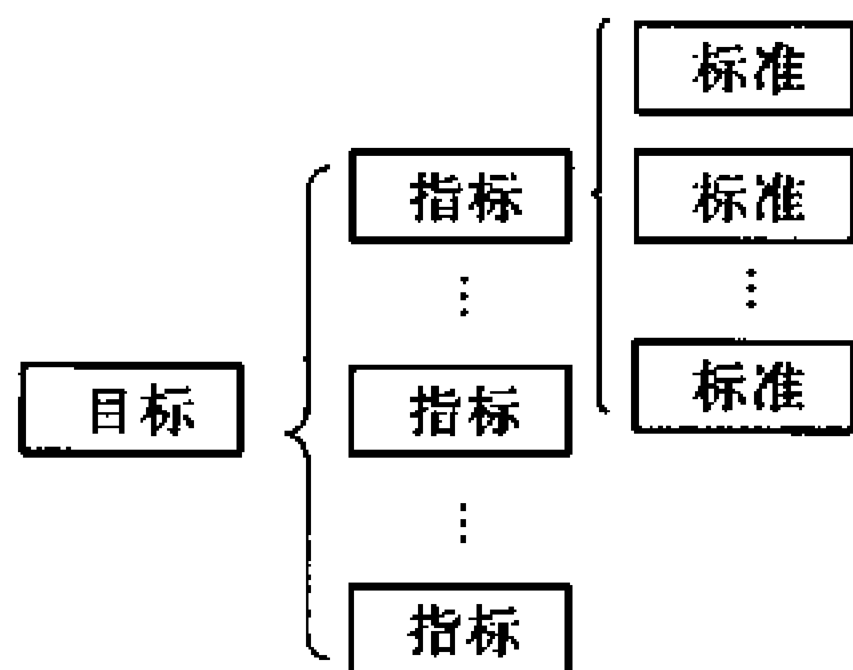


图7.6 目标、指标、标准三者之间的结构关系

2. 指标体系

系统评价指标体系，是由若干个评价指标按照系统的内在规律和逻辑结构排列组合而成的有机整体或集合。评价指标体系一般具备4个基本特征，见表7.2。

表7.2 系统评价指标体系的特征

集合性	评价指标体系是具有相互关系的若干个评价指标的总和
关联性特征	评价指标体系中的各指标之间都是互相联系、互相影响的
层次性	评价指标体系由若干个层次构成，一般分为一级指标、二级指标、三级指标，指标的层次越高，则越原则、越笼统；层次越低，则越具体、越明确
整体性	评价指标体系是若干个评价指标的有机组合体，而不是简单的相加或堆积

7.3.2 建立系统评价指标体系的过程

系统评价指标体系建立的过程[2]，如图7.7所示。

1. 目标分析

目标分析是建立指标体系的前提，确定系统的目标层次结构是建立指标体系层次结构的基础。

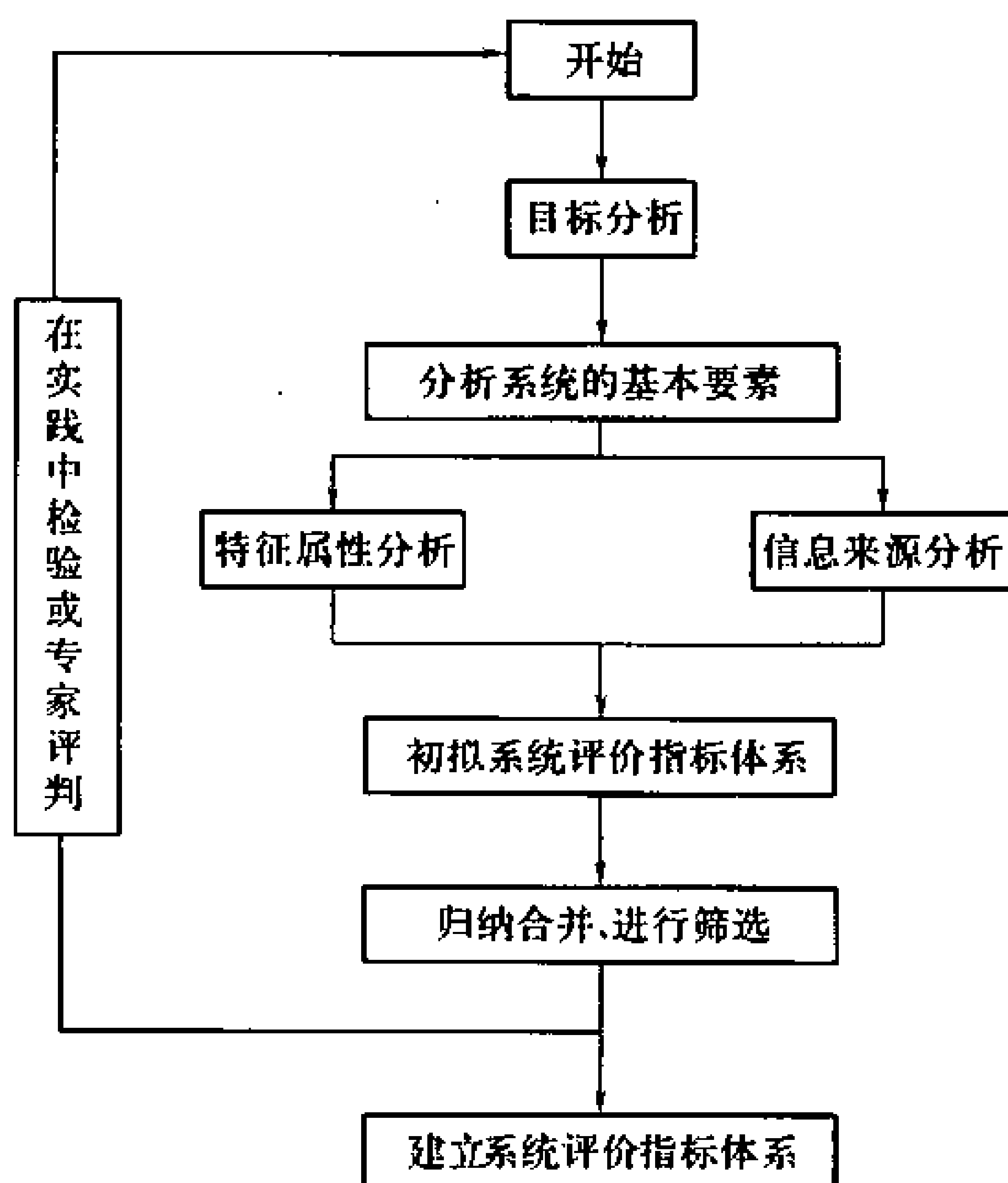


图7.7 系统评价指标体系建立的过程

目标,就是系统所要达到的目的,是要求系统达到的期望状态。对系统的要求和期望是多方面的,这些要求和期望反映在目标上,就形成了不同类型的目标。目标主要包括总体目标和分目标;战略目标和战术目标;近期目标和远期目标;单目标和多目标;主要目标和次要目标等。

2. 分析系统基本要素

采用系统工程的观点和方法,对系统进行分析,弄清系统形成的影响要素,澄清各要素之间的关系。

3. 特征属性分析

特征属性分析就是对各要素的特点进行分析,建立与之相适应的指标,弄清各指标的本质属性,为各指标建立数学模型、获取评价信息奠定基础。

指标属性指每个指标是定性的还是定量的,是静态的还是动态的,具体定义如下:

(1) 定性指标是指不可用数量描述的指标;

(2) 定量指标是指可以通过分析、计算得到具体数量来描述的指标;

(3) 静态指标是指不随时间、环境条件等因素变化而变化的指标;

(4) 动态指标是指随时间、环境等条件变化而变化的指标。

4. 信息来源分析

对系统进行评价,离不开信息。对信息来源的分析,可以加深对系统的理解,

也可以通过掌握的第一手资料更准确地对系统进行分析。指标信息的来源，通常有以下几种：有关数据库；公式计算；统计分析；专家咨询；主观估计等。

5. 初拟评价指标体系

上述各项工作完成后，便可以初拟评价指标体系。

6. 归纳筛选

在初拟指标体系所分解出来的各要素中，有的能反映系统的本质，有的则未必。各要素之间还可能出现交叉、重复、包含、矛盾、因果等关系。因此，必须对初拟指标体系进行归纳合并和筛选，以达到少而精的要求。经过这一程序，指标可以得到精简，指标质量可以提高，不仅便于实施评价，也能保证评价的有效性。这是设计指标体系过程中十分关键的一步。

7. 专家评判

经过归纳筛选后的指标体系，需广泛征求专家、业务机关和有关专业人员的意见和建议，形成较完善的系统评价指标体系。

7.3.3 实例分析

本节将以部队装备保障能力评价作为实例，分析系统评价指标体系的建立过程。

建立装备保障能力评价指标体系，必须按照一定的程序，采用科学的方法和技术，才能使构建评价指标体系的工作井井有条，使构建的评价指标体系达到较为理想的要求。

1. 装备保障能力的构成要素

装备保障能力有以下八大要素：

(1) 装备保障人员。他们是装备保障活动的主体，装备保障人员按职能可分为装备保障指挥员、管理人员、技术保障人员三大类。

(2) 装备保障对象。直接用于作战的装备就是保障对象，一切装备保障活动，必须有利于提高装备的完好率，有利于装备效能的发挥。

(3) 装备保障装备。它是实施装备保障的手段或工具，主要包括用于使用、维修保障的各种配套装备，高技术装备必须要用高技术保障手段来保障，两者必须协调发展。

(4) 装备保障器材。指装备使用与维修中所需的备件与消耗品。

(5) 装备保障设备[7]。指储存、使用与维修装备所需的各类设备，装备保障设备通常包括装备技术准备设备、储存设备、测试设备、维修设备等。

(6) 装备保障设施。它是装备使用、维修、训练和储存所需的永久和半永久性的构筑物及其有关设备，如备件仓库、维修车间、训练场地等。

(7) 装备保障信息与指挥控制。装备保障信息是指与装备保障活动有关的各

种情报和资料，包括敌军情报、上级命令、指示、本级决心、装备预案、装备技术状况、地形气候资料、战场态势、战损报告等。装备保障能力的体现，关键在于"装备保障指挥控制"机构的运转。

(8) 装备保障法规制度[8]。装备保障法规是关于装备保障方面的条令、条例、规章、制度、技术标准等的统称。它既从总体上规定了装备保障各个层面、各个部门有关装备保障的行为关系，也在具体操作层面上规范了装备保障活动的技术要求，为装备保障行动提供了行为规范，明确了其正确与否的衡量标准和尺度。

以上诸要素构成了装备保障的基础。其中装备保障人员与保障对象构成了装备保障活动的主体与客体，装备保障装备、器材、设备、设施与信息是装备保障活动的基础，装备保障法规是装备保障活动的依据、标准与要求，装备保障指挥则是将其他诸要素有机的联系起来共同发挥作用的中介。各要素是相互依存、相互制约、密切相关、缺一不可的。

2. 初拟评价指标体系

首先要按建立装备保障能力评价指标体系的原则和要求，对目标进行分解，依据一定规律、要求和结构对指标进行排列，初步形成指标体系。

初拟评价指标体系主要采用"经验法"进行。

经验法，一般由一名或多名具有装备保障能力评价经验的专家，对装备保障能力建设的总体目标进行分解，按分解原则，合并同类，删除重复的要求进行。而后由专人起草，再经过集体修改，形成初拟的评价指标体系。

在初拟指标时，必须遵循 SMART 原则，见表 7.3。

表 7.3　SMART 原则

SMART 原则	正确做法	错误做法
具体的 S(Specific)	切中目标，适度细化，随情境而变化	抽象的，未经细化； 复制其他情境中的指标
可度量的 M(Measurable)	数量化的，行为化的； 数据和信息具有可得性	主观判断，非行为化描述； 数据或信息无从获得
可实现性 A(Attainable)	在付出努力的情况下可以实现， 在适度的时限内实现	过高或过低的目标； 期限设置过长
现实的 R(Realistic)	可证明的； 可观察的	假设的； 不可观察的或不可证明的
有时限的 T(Time—bound)	使用时间单位； 关注效率	不考虑时效性； 模糊的时间概念

SMART[9]是5个英文单词首字母的缩写。按照以上5个原则对已罗列出来的指标进行审查，剔除不同时满足上述原则要求的指标，保留的就是初拟的指标体系。

3. 对初拟的评价指标体系进行归纳筛选

初拟的装备保障能力评价指标体系只是给出了评价指标体系的"指标可能全集"，但一般不是"充分必要的指标集合"；因此，必须对其进行检验并归纳筛选，加以完善和优化。

运用调查统计法，先由专家凭各自的经验对初拟的评价指标体系，做出初步判断，然后由调查组织者，采用统计法对评判结果进行汇总，筛选评价指标体系。

假设有 n 个评价指标 $I_1, I_2, I_3, \cdots, I_n$，其重要性大小分别为 $x_1, x_2, x_3 \cdots x_n$，这里 x_i 都是正数，其值越大，表示相应的指标越重要。从 n 个指标筛选出重要的指标，剔除不重要的指标，称为重要性筛选。其方法如下：将指标重要统计数按大到小的顺序排列，记为 $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_n$，并记 $x = \sum_{i=1}^{n} x_i$，求最小的 m，使得 $\sum_{i=1}^{m} \frac{x_i}{x} \geqslant a$（$a$ 为小于1的常数，称为重要性系数），$x_1, x_2, x_3, \cdots, x_m$ 对应的指标 $I_1, I_2, I_3, \cdots, I_m$ 为重要性指标，一般取 $a \geqslant 0.7$[10]。

具体做法是：把初拟指标制成问卷，发给专家（10人），请他们对初拟指标的每一项的重要性做出判断。例如把评价指标划分为五个档次，分别赋一个权值，非常重要（5分），重要（4分），一般（3分），可要可不要（2分），不要（1分）。专家对每项指标的重要性后记上自己的判断（只能定一个档次）。然后，收回问卷。统计每项指标"非常重要"和"重要"的总得分，按照人数比例，把低于一定数值（0.7）的指标删除，得到经过筛选的指标。

然后，邀请专家对经过筛选的指标，分析其与评价目的的一致性，指标的正确性、可行性、必要性和独立性，尽量减少指标体系中的指标的个数，得到简化的评价指标体系，即可投入使用。装备保障能力评价的主要指标，如图7.8所示。

4. 建立装备保障能力评价标准体系

评价就是进行价值判断，要判别价值高低，就必须有一个衡量标准，没有标准，评价工作就难以进行。评价装备保障能力，就是以装备保障的标准体系为基本尺度，对评价指标的实现程度做出具体判断。因此在建立了评价指标体系之后，还必须建立一个与评价指标体系相配套的评价标准体系。由于篇幅关系，在此只介绍装备管理使用能力的评价标准体系，见表7.4。

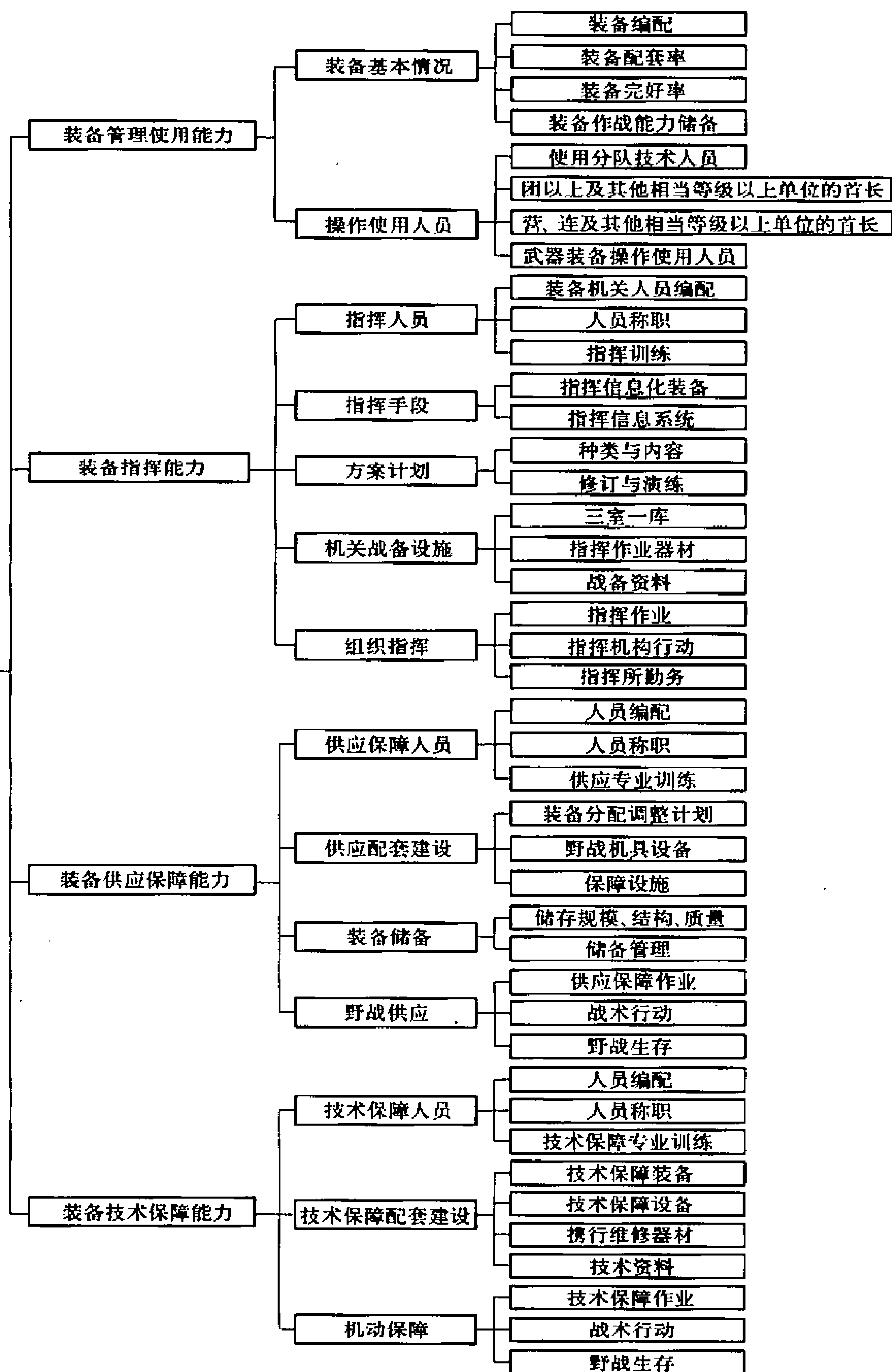


图 7.8　装备保障能力评价指标体系

表 7.4 装备管理使用能力

一级指标	二级指标	三级指标	评价标准
装备管理使用能力	装备基本情况	装备编配	1. 按编制标准配齐
		装备完好率	2. 武器装备完好率符合规定标准
		装备配套率	3. 随装工具、附件、备品和资料文书配套齐全，数量质量满足作战和保障要求，储存保管符合规定
		装备作战能力（寿命）储备	4. 装备及其主要分系统、部件有足够的作战能力储备
	操作使用人员	作战（使用）分队技术人员	5. 人员满编
			6. 专业对口
			7. 熟悉所属分队装备动态、技术状况、所属人员技术能力、会组织分队装备管理、战时装备使用、保养和抢救抢修
		团以及其他相当等级以上单位的首长	8. 熟悉所属部队主要武器装备的数量和质量情况、基本性能和日常管理制度
		营、连及其他相当等级单位首长	9. 熟悉所属装备的数量和质量情况、基本性能和日常管理制度
		武器装备操作使用人员	10. 熟悉配发或者分管的武器装备，会操作使用、会检查、会维护保养、会排除一般故障

7.4 系统评价指标权重

《韦氏大词典》中对权重（weight）的解释为：在所考虑的群体或系列中，赋予某一项目的相对值；在某一频率分布中，某一项目的频率；表示某一项目相对重要性所赋予的一个数。从上述定义中可以得出两点结论：

（1）权重是表示要素重要性的相对数值；

（2）权重是通过概率统计得出的频率分布中的频率。

确定指标的权重的方法有很多种，大致可以分为两类：主观赋权法是利用专家或个人的知识和经验，具有代表性的有：德尔菲法（Delphi）、专家调查法（EIM）、比较矩阵法（CMM）、层次分析法（AHP）、环比评分法（CMM）、模糊区间法（FIM）、重要性排序法（IOM）、二项系数加权和法（TWM）、直接给出法（DDM）等方法；客观赋权法是从指标的统计性质来考虑，它是由调查所得的，不需征求专家们的意见，具有代表性的方法有：熵值法、主因子分析法、灰色关联分析法、多元回归分析法等。

从以上确定权重的方法可以分析出主观赋权法和客观赋权法的优缺点，见

表7.5。

表7.5 主观赋权法和客观赋权法的优缺点

	优点	缺点
主观赋权方法	专家可根据实际问题,较为合理地确定各分量的重要性	主观随意性大,且并未因采取诸如增加专家数量和仔细选取专家而得到根本改善,故在个别情况下采用单一的主观赋权可能与实际情况存在较大的差异
客观赋权方法	具有绝对的客观性	有时会因为所取样本不够大或不够充分,最重要的分量不一定具有最大的权重,最不重要的分量可能具有最大的权重

综上所述,在实际确定指标权重中,可选用一种或几种主观赋权法和客观赋权法,按一定组合形成综合权重,称之为组合赋权法。

7.5 系统评价信息的获取与处理

7.5.1 系统评价信息的获取

对系统评价的政策依据是评价指标和评价标准,客观依据是评价信息。显然,评价信息是系统客观情况的具体反映。

1. 组建系统评价小组

系统评价的决定性因素是人,配备一支精干高效的评价队伍非常重要。系统评价小组成员的选择基本限定于系统利益相关者的范围,这样有利于提高评价小组的工作质量、改善利益群体之间的关系。"利益相关者"[11],泛指与组织存在各种关系的个人或团体。受规模的限制,并非所有利益相关者都能成为系统评价小组的成员。一般而言,系统评价小组的规模以10人为宜,人数过多,意见统一和工作协调的难度大,影响评价效率;人数太少,容易导致信息失真、侵蚀评价的公正性,甚至产生"权力寻租"现象,而且部分群体可能因为没有自己的代言人而利益受损。

系统评价小组成员的选择范围确定以后,小组成员的素质和水平决定了评价的质量,在选择小组成员时,应重点考察成员的观察和分析能力;名单确定后,需要对他们进行短期培训,让每位成员清楚地知道5W和1H:Why——本次活动的重要性;What——本次任务的界定;Who——确定每项职责的承担者;Where——本次任务的切入点、重点和难点;When——对每项具体任务做出时间规定;How——为圆满完成任务而采取的行动和措施。

2. 获取系统评价信息的原则

评价信息的获取,必须遵循一定的原则[3,4,12],具体地说,就是要做到:①评价

信息的真实可靠。克服主观推测、偏听偏信、以偏概全等。②评价信息的经常及时。尽量缩短样本点之间的时间间隔，克服采样不均匀的现象。③评价信息的系统全面。不仅尽可能使获取的评价信息是互相联系的，与评价指标体系相对应的，能够形成评价信息链，而且尽可能使获取的评价信息是纵横有序的，能够形成评价信息群。④评价信息的形式多样。

采取多种形式，从多个渠道、多个方面进行测量，以反映事物的复杂性。

3. 获取系统评价信息的方法

在上述原则下，评价小组成员可以通过多种方法，多视角地收集系统评价信息。通常采取的方法有以下几种[12]：

（1）座谈了解。座谈中，要引导座谈人员采取规范化的方式提供评价信息：如很好、较好、一般、较差、差等五级，也可采用优秀、良好、合格、不合格等四级，为下一步的处理提供方便。

（2）问卷调查。通过组织人员回答预先设计好的调查问卷上的问题来获取评价信息，调查问卷的格式通常有两种：选择式，让答卷人在“是”与“否”，“有”与“无”，“好、中、差”或“优、良、中、差”等栏目中选择合适的答案并打“√”。

（3）考试考核。采取书面考核或者实际作业考试形式，获取评价信息。

（4）实地检查。通过实地检查获取评价信息，既有定量的，也有定性的，凡是能用定量方法测量的，尽可能使用定量方法。

（5）统计上报。通过由下级统计或上报的有关报表、材料来获取评价信息的方法。

（6）查阅资料。通过查阅系统的有关资料获取评价信息的方法。

7.5.2 系统评价信息的处理

通过多渠道、多种方式捕获的原始信息难免量大繁杂、肤浅零乱，甚至可能掺杂着一些虚假、无关或过时的信息，这就需要进行信息加工。

首先对评价信息进行筛选，其基本要求[13]：可靠性、针对性、时效性。通过过滤，保留真、准、新的信息，淘汰假、错、旧的信息，从而提高评价信息的质量。

然后对评价信息进行分级，就是采用 ABC 分类法，按信息的重要性进行排序。ABC 分类法[14]的理论依据是巴莱特法则，即“关键的少数与次要的多数”之间的关系。它的基本方法是，以能否说明系统的程度为标准，把筛选后的评价信息分成 A，B，C 三个等级，如图 7.9 所示。

A 类为核心信息，B 为次要信息，C 为外围信息。通常 A、B、C 三个等级之间的信息比例是 1:2:7，其中 A 类信息不宜超过 20%。

原始信息经过筛选和分级，再经过一定的提炼和梳理，评价信息就由“偏”到全（数量上）、由“碎”到整（逻辑上）、由“粗”到精（质量上）。

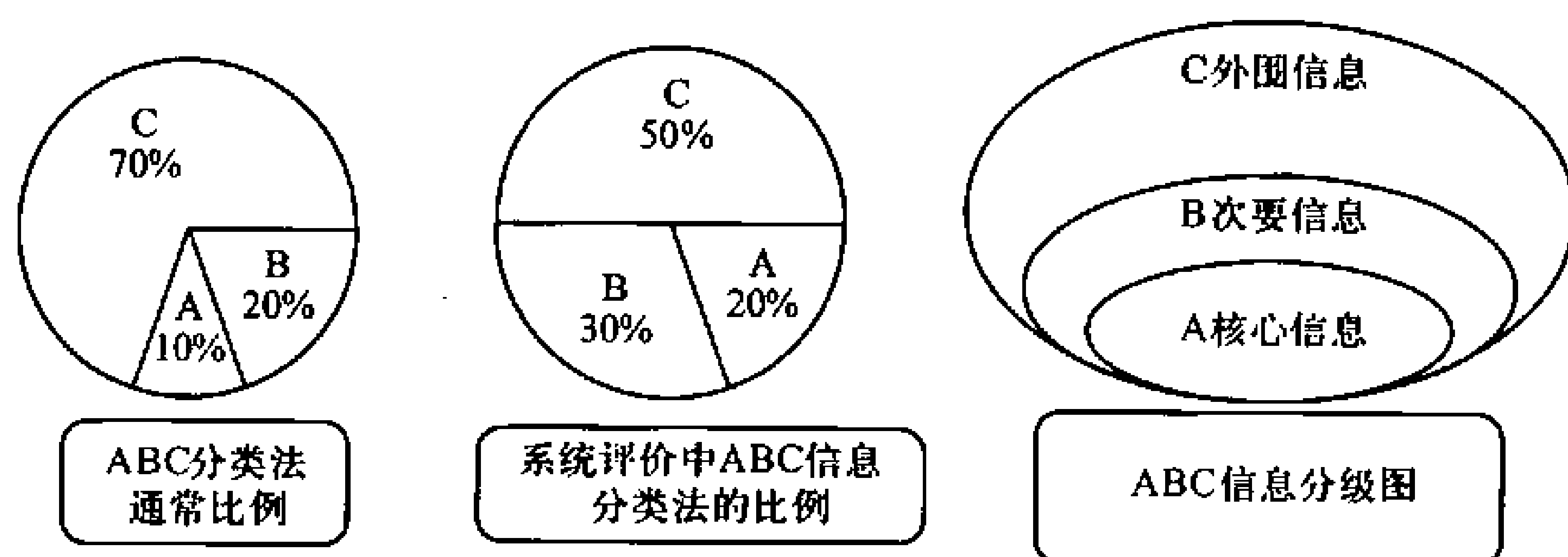


图 7.9　ABC 分类法

通过上述方法加工以后的大量评价信息，其形式必然是多样的，还可能存在着大量的模糊信息，不能直接作为综合评价的标准信息进入数学模型。因此，必须对所获取的评价信息进行处理，使它们成为统一的、量化的、标准的、无量纲的评价信息。

在人们的思维活动中，每一个概念都有一定的内涵和外延，经典集合的内涵和外延都是明确的，由特征函数的取值范围"非此即彼"严格界定[15]。但是在现实中存在大量的模糊概念，它们没有明确的外延，如老年人，高个子，这些都不能用经典集合描述，这是因为不能绝对地划分属于或者不属于，只能说属于的程度是多少。这时可以在经典集合的基础上把特征函数的取值范围从集合$\{0,1\}$扩大到在$[0,1]$区间连续取值。为了与经典集合区别，把模糊集合的特征函数称为隶属函数，记为与$\mu_A(x)$。其定义如下：

论域 U 中的模糊集合 A 是以隶属函数 μ_A 为表征的集合，即对任意 $u \in U$：有 $u \to \mu_A(u)$，$\mu_A(x) \in [0,1]$，称 $\mu_A(u)$ 是元素 u 对 A 的隶属函数。它表示 u 属于 A 的程度，$\mu_A(u)$ 的值越接近 1，表示 u 从属于 A 的程度越高，反之越低。模糊集合是用隶属函数描述的，以隶属函数为基础建立起模糊集合论。因此，如何建立符合实际的合适的隶属函数在模糊数学中占有重要地位，这是模糊数学建立的基础，同时也是进行信息处理不可缺少的重要环节。确定隶属函数的方法很多，这些方法本质上是客观的，但也允许有一定的人为技巧。下面两种是经常使用的方法：

(1) 专家评定法。这种方法的特点是请富有经验的专家，根据自己的经验，确定隶属度函数的形式或直接给出隶属度值，再加以实际验证和不断加以调整完善。

(2) 分布法。这种方法就是将概率论中的分布函数作为实数 R 上的模糊分布函数，再按实际问题和不同的模糊分布函数的特征，去选取一定的模糊分布函数作为隶属函数。最为常见的模糊分布有正态型分布，三角形分布，梯形分布，柯西型分布，等等。

7.6 层次分析法

系统综合评价的方法有多种，这里只讨论层次分析法（Analytic Hicrachy Process, AHP），它是由美国著名运筹学家萨蒂教授（T. L. Saaty）于20世纪70年代提出的。它可用于求解非序列多层目标准则体系结构的问题。AHP法是一种定性分析与定量分析相结合的多目标评价方法。这种方法将管理者的经验判断给予量化，特别适用于目标结构复杂且缺乏必要数据的情况。20世纪80年代以来，开始在我国管理学界得到比较广泛的应用。

1. 层次分析法的原理[17,18]

1）根据两两比较进行排序

层次分析法解决多目标评价问题的基本思路是，首先找出决策问题所涉及的主要因素，将这些因素按目标、准则、措施（方案、手段）等分类；然后，构造一个反映各因素关联隶属关系的两两成对比较，得到各因素的相对重要性排序；最后按层次结构关系，得到对各备选方案的综合排序。关键是通过两两成对比较，得到各因素的相对重要性排序。

下面说明这样做的依据，设有 n 个物体，它们的重量分别为 $w_1, w_2, \cdots, w_n$。若将它们两两比较重量，其比值可构成 $n \times n$ 矩阵 $\boldsymbol{A}$

$$
\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \cdots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}
$$

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 具有如下性质：若用重量向量

$$
\boldsymbol{W} = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^{\mathrm{T}}
$$

右乘矩阵 $\boldsymbol{A}$，得到

$$
\boldsymbol{AW} = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \cdots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \cdots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \cdots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} =
$$

$$
n\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = nW
$$

即是说，对于矩阵 A 来说，向量 W 为 A 的特征向量，实数 n 为 A 的特征值。如果通过对物体重量的两两对比，确定出判断矩阵 A，那么求解其特征方程即可确定特征向量 W，即确定各物体的相对重量。

2）两两对比的量化

为了由各因素之间的两两比较得到量化的判断矩阵，根据心理学关于人们区分信息等级的极限能力为 7 ± 2 种的结果，引入 $1\sim9$ 的标度，其含义见表 7.6。可见 $n\times n$ 矩阵，只需要给出 $n(n-1)/2$ 个判断数值。

表 7.6　AHP 两两比较标度

相对重要性	定义	注　释
1	同等重要	两个因素 i,j 同样重要
3	略微重要	经验判断因素 i 比因素 j 略微重要
5	相当重要	经验判断因素 i 比因素 j 重要
7	明显重要	深感因素 i 比因素 j 重要，并已被实践证实
9	绝对重要	强烈地感到因素 i 较因素 j 占绝对主导地位
2,4,6,8	两相邻判断间的中间状态	表示需要在两个判断之间取折中值
倒数	$a_{ij}=1/a_{ji}$	因素 i 与因素 j 比较所得到的判断值

由判断矩阵 A 的构造可知它具有以下特征：

(1)　　　　$a_{ii}>0$

(2)　　　　$a_{ij}=1/a_{ji}$

(3)　　　　$a_{ii}=1$

一般地，把具有以上三个特征的矩阵称为正互反矩阵。因此层次分析法中的判断矩阵 A 是正互反矩阵。

3）判断矩阵的一致性检验

在计算单准则下排序权重向量时，还必须进行一致性检验。在构造判断矩阵时，各层元素间两两比较时，a_{ij}应有某种传递性质，即若甲比乙重要，乙比丙重要，合理地认为，应有甲比丙更重要，在数值上表示为 $a_{ij}\cdot a_{jk}=a_{ik}$，即若 x_i与 x_j相比 $a_{ij}=3$，x_j与 x_k相比 $a_{jk}=2$，那么由传递性，判断 x_i与 x_k相比 $a_{ik}=6$。因此，若判断矩阵 A 满足 $a_{ij}\cdot a_{jk}=a_{ik}(i,j,k=1,2,\cdots,n)$，则称 A 是一致性矩阵。

然而，在判断矩阵构造中，并不可能完全做到该判断矩阵是一致性矩阵，这是由于客观事物的复杂性与人的认识的多样性所决定的。但要求判断矩阵有大体上

的一致性是应该的。我们可用 λ_{max} 与 n 之差来度量对完全一致性的偏离。

引入判断矩阵的一致性指标 C. I. :

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

C. I. 越大,表明判断矩阵偏离完全一致性越严重。反之,则越接近完全一致性。一般情况下,n 越大,人为造成偏离完全一致性的指标 C. I. 便越大;反之,这种偏离越小。当 $n<3$ 时,判断矩阵肯定具有完全一致性,即 C. I. =0。因此,对于多阶判断矩阵,还需引入平均随机一致性指标 R. I. 。

表 7.7 列出了 $n=1\sim9$ 阶判断矩阵的 R. I. 值。

表 7.7　判断矩阵的 R. I. 值

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R. I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

判断矩阵的一致性指标 C. I. 与同阶的平均随机一致性指标 R. I. 之比,称为判断矩阵的一致性比例,记为 C. R. 。

$$C.R. = \frac{C.I}{R.I}$$

显然,用 C. R. 衡量任何阶数的判断矩阵的一致性更为合理,阶数 n 大的,C. I. 值可放宽一些,阶数 n 小的,C. I. 值便要从严控制。

$$C.R. < 0.01$$

只有 C. R. 满足上式时,便认为判断矩阵具有满意的一致性。否则,就需要调整判断矩阵,从而达到满意的一致性。

4) 近似计算判断矩阵的特征值的方根法

最后,简要说明计算判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值与特征向量的一种近似方法——方根法。其计算步骤为:

(1) 计算 $\boldsymbol{A}$ 每行所有元素的几何平均值

$$\bar{w}_i = \left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}, i = 1,2,\cdots,n$$

(2) 将 $\bar{w}_i$ 归一化,即计算

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^{n} \bar{w}_j}, i = 1,2,\cdots,n$$

$\boldsymbol{W} = (w_1, w_2, \cdots, w_n)^T$ 即所求特征向量的近似值。

(3) 计算 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征值 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(AW)_i}{nw_i}$$

其中,$(AW)_i$ 为向量 AW 的第 i 个元素。

2. 层次分析法的步骤

层次分析法的步骤如图 7.10 所示。

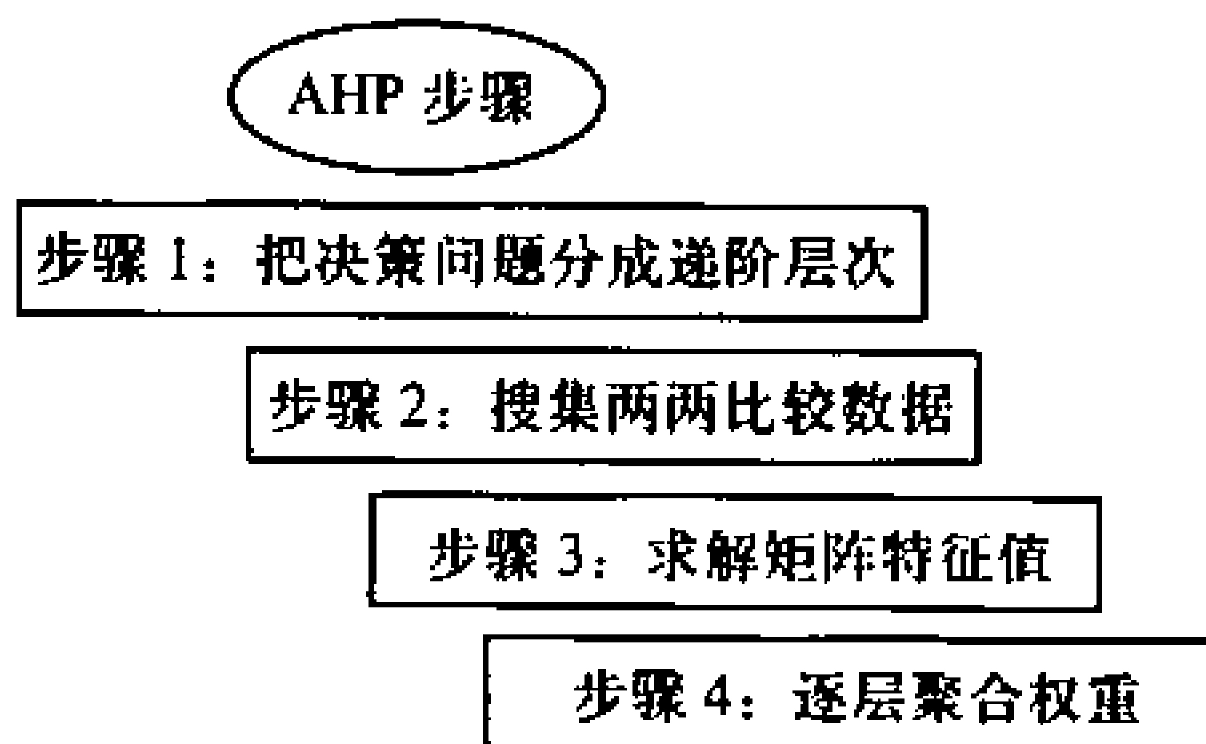


图 7.10　层次分析法步骤

[例 7.5]　对同一类型的武器装备,已经遴选出 3 个采办方案,由于厂家的不同,型号品牌各异,武器装备的作战效能与造价以及采购成本也各不相同,因此必须全面考察衡量这 3 个采办方案的定性与定量指标,试用层次分析法进行系统评价,以辅助管理部门的决策。

第一步,需要作层次分解。首先把选择最佳的武器装备采办方案这个总目标,放在层次结构最高层。第二层是衡量目标最佳的准则,它们是:

B1. 武器装备作战效能,这个准则主要考察武器装备各作战指标参数与作战效能等;

B2. 武器装备采购成本,这个准则主要考察各装备的造价,采购成本等经济费用指标;

B3. 武器装备使用维护性能,这个准则主要考察各装备的使用方便性(人性化指标)、使用寿命,以及维护性能是否良好,维护成本的高低等指标。

最后一层即最底层,列出备选的采办方案。图 7.11 是简化的选择最佳武器装备的简化层次模型。为了简化举例,图中没有列出准则属性层和方案属性层,这并不影响对步骤的说明。

层次分解中要注意的是,使同一层次各因素的相对重要性相差不超过一个数量级。

第二步,是按表 7.7 给出的两两比较标度,对每一层的因素进行两两比较。比较的结果得到一系列判断矩阵。本例的判断矩阵包括:

(1) 各准则(B_1,B_2,B_3)对最佳采办(A)重要性的两两比较结果;

(2) 各方案(C_1,C_2,C_3)关于作战效能(B_1)重要性的两两比较结果;

(3) 各方案(C_1,C_2,C_3)关于采办成本(B_2)重要性的两两比较结果;

(4) 各方案(C_1,C_2,C_3)关于使用性能(B_3)重要性的两两比较结果。

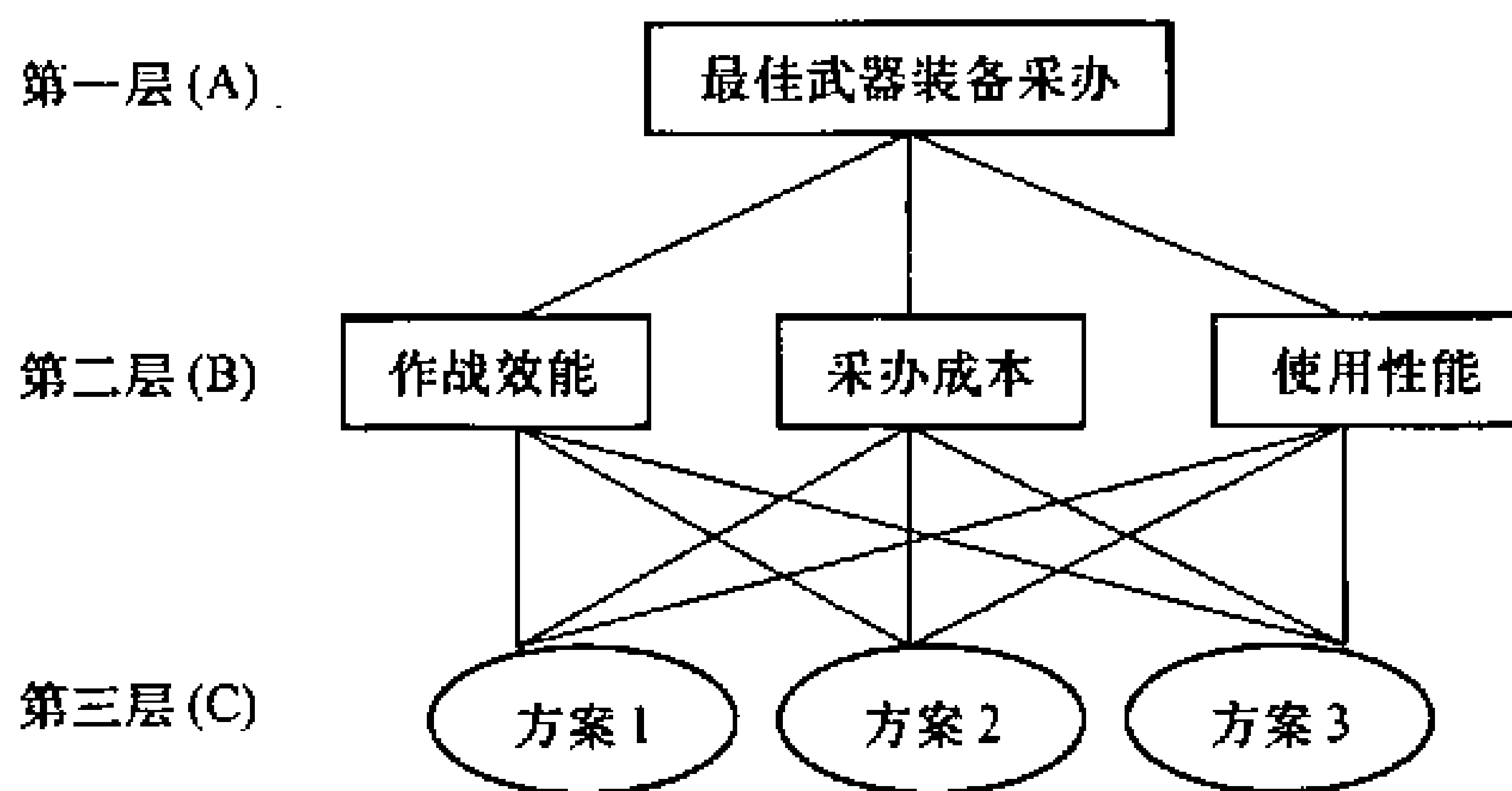


图7.11　选择最佳的武器装备的简化层次模型

表7.8给出各方案关于作战效能的两两比较判断矩阵。这里的重要性是指相关各要素关于上一层准则的优劣程度,即优秀的就认为重要性高。

在两两比较中,要注意的问题是确保判断矩阵的一致性(例如判断 A > B,B > C 而 A < C 就是一种判断不一致)。现在已经有一些方法(如借助模糊数构成模糊判断矩阵)可帮助决策者迅速得到满足一致性条件的判断矩阵。

第三步是应用特征值求解技术(如方根法)求判断矩阵的最大特征值。表7.8所列判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{max}=3.0$。特征向量,即方案1,2,3关于作战效能的排序权重为0.143,0.286,0.571。

表7.8　各方案关于作战效能重要性的两两比较判断矩阵

作战效能(B_1)	方案1	方案2	方案3	权重
方案1	1	1/2	1/4	0.143
方案2	2	1	1/2	0.286
方案3	4	2	1	0.571

为避免判断比较的不一致性,在求出 λ_{max} 后,应检查一致性比值 C.R.,要求 C.R. <0.1. 显然,表7.8所列判断矩阵满足一致性条件。

第四步是聚合各层权重以得到合成权重向量。合成权重向量表示各备选方案相对于决策目标的权重排序。在本例中,第二层、第三层各因素的相对权重如表7.9所列。

表7.9　相对权重

第二层

目标 \ 因素	作战效能	采办成本	使用性能
选择最佳采办方案	0.5	0.3	0.2

第三层

因素 \ 方案	方案1	方案2	方案3
作战效能	0.14	0.29	0.57
采办成本	0.2	0.1	0.7
使用性能	0.2	0.3	0.5

组合权重的计算结果如下：

方案 1 权重 =0.5 ×0.14 +0.3 ×0.2 +0.2 ×0.2 =0.17

方案 2 权重 =0.5 ×0.29 +0.3 ×0.1 +0.2 ×0.3 =0.235

方案 3 权重 =0.5 ×0.57 +0.3 ×0.7 +0.2 ×0.5 =0.595

这个结果说明方案 3 优于方案 1 和方案 2。

参考文献

[1] 杜玠,陈庆华. 系统工程方法论[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1992.

[2] 郭齐胜,郅志刚,杨瑞平,等. 装备效能评价概论[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[3] 陈宏民. 系统工程导论[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[4] 杜栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[5] 黄维忠. 指标权重的二阶段赋权法及其应用[J]. 上海海运学院学报,2003(2).

[6] 中国社会科学院语言研究所词典编辑室. 现代汉语词典[M]. 北京:商务印书馆,1983.

[7] 曹小平,孟宪君,周红,等. 保障性论证[M]. 北京:海潮出版社,2005.

[8] 郑怀洲,陆凯. 军事装备管理学[M]. 北京:军事科学出版社,2001.

[9] 吴志明. KPI:帮你解决绩效评价中的难题[J]. 中外管理导报,2001(2).

[10] 程启月. 作战指挥决策运筹分析[M]. 北京:军事科学出版社,2004.

[11] 陈维政,吴继红,任佩瑜. 企业社会绩效评价的利益相关者模式[J]. 中国工业经济,2002,7.

[12] 吴惠芳. 基层连队建设评价方法研究[M]. 长沙:国防大学出版社,2005.

[13] 黄雪清. 浅谈新形势下企业信息的筛选[J]. 情报探索,1994(1).

[14] 郭京生. ABC 分类法在认识考核表设计中的应用[J]. 华北电力大学学报,1998(1).

[15] 杨纶标,高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 4 版. 广州:华南理工大学出版社,2002.

[16] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

[17] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988.

[18] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,2000,14(2):80 – 88.

[19] 王婷婷,姚奕. 基于模糊理论的某型导弹武器系统综合保障能力评估[J]. 理论与探索,2007(2):23 – 25.

第8章 系统决策

决策活动遍及人类社会的所有领域,从广义上来讲,决策贯穿管理活动的全过程,从狭义上来说,系统工程和系统分析的基本逻辑程序框的最后一个程序就是决策。从这个意义上来说,系统分析、系统预测、系统模型、系统模拟、系统评价等“工序”的出发点和落脚点,都是为了决策。总的来说,“决策”是决策者的“专利”,凡属重大决策,都要采用科学的决策方法,遵照一定的决策程序,列出多种可能的方案,从众多方案中选择最优方案,做到首脑机关决策与专家辅助决策相结合。本章关注的重点是,为了辅助决策,讨论辅助决策的一般过程和方法。

8.1 实 例

首先看两个例子。

[例8.1] 轿车总装厂选址问题

20世纪80年代以后,发展小轿车引起国内的重视,各有关部门酝酿建设年产量30万辆小轿车的总装厂。1988年1月,湖南省政府组织国内相关领域的专家对总装厂的定点选址进行分析论证。来自国内各汽车生产厂家、科研院所的汽车制造专家以及本书作者(系统工程人员)参加了这次综合论证会。会议选在湖南省洞庭湖畔的岳阳,通过实地考察、分析论证,多数参会者认为洞庭湖的长江入江口城陵矶具有总装厂选址的许多优越条件。作者当时作为系统工程论证报告的主笔人,建议《论证报告》分为四个部分,论证工作也分四个阶段进行。

(1) 为什么要建年产30万辆的小轿车总装厂?

(2) 这种型号小轿车的主要购买消费者是谁?

(3) 总装厂定点选址应具备哪些条件?

(4) 城陵矶对总装厂选址有哪些优势和劣势?

参加分析论证会的专家们意见比较一致,认为我国汽车工业的发展,催生小轿车总装厂的诞生,主要销路是出口,少量销往内地,内地主要用户是乡镇企业的老板,那些首先富起来的“农民企业家”。洞庭湖畔的岳阳与美国五大湖区的汽车城底特律比较相似,可以出厂经湖,联江出海,销往国外,如图8.1、图8.2所示。

图 8.1　美国五大湖区

图 8.2　湖南岳阳城陵矶

制约因素之一是船只通过武汉长江大桥时,在枯水季节,水面可能不够宽,影响运力,在丰水季节,水面离桥底高度不够,会触及桅杆。有的专家提出解决办法,可以采用两种载量的运输船只,在丰水季节,可以采用折叠式桅杆克服。专家们一致强烈呼吁,以后再建长江大桥时,不能以武汉长江大桥的高度作参考,一律应高于武汉长江大桥,以便必要的时候拆除武汉长江大桥,再修一座更高的武汉长江大桥。

形成的"论证报告"送到国家有关部门,后来刊登在 1988 年《内参》第 712 期上。再后来,据说,湖北和江苏也分别组织了类似的论证工作,都是选在长江的沿岸城市。但是,总装厂最后没有定在岳阳,长江沿岸的其他几个选址点也都没有被选中。原因不得而知,但是论证工作一开始,就限定在"联江出海、销往国外"这一前提可能使论证指向发生了偏差。无论是什么原因造成的"城陵矶落选",城陵矶这个地方,确实是一个"组装和转运"的理想选址,依靠岳阳这块沃土,又有五江一湖(湘江、资江、沅江、澧水、长江、洞庭湖)的水上交通优势,紧邻张家界、长江三峡等风景区,城陵矶一定会在未来的某一天突然闻名天下。

[例 8.2]　生死抉择

2002 年年底,总参军训部组织军队院校开展军事硕士专业学位试点工作的单位进行案例教学研讨,总参军训部、国防大学、空军等首长和各有关院校的院校长、训练部长、研究生院部处长出席了研讨会,同时要求地处北京市区附近的国防大学、后勤指挥学院、装备指挥技术学院、空军指挥学院、防化指挥工程学院、装甲兵工程学院、陆军航空兵学院、炮兵指挥学院等院校各派 10 名军事课教员列席参加会议。出席研讨会的共有 200 多名军官。

12 月 18 日上午,会议特别邀请大连理工大学经济管理系张丽华教授为与会代表上了一堂案例教学示范课。下面是案例的情形。

一架地方航线的双引擎轻型民航飞机,载着 12 名旅客,于元月 16 日上午8:02

从省城机场起飞，目的地是位于北方中俄边境的一座城市。机组由正副驾驶员组成。飞行 34min 后，发现航线前方有浓云、大雪及强烈寒风，必须绕行躲避。又继续飞行 27min 后，通信设备发生故障，与地面基地失去联络。气候仍不见好转，能见度很差。驾驶员发现已经迷航，但已无法返航，只好继续北飞，并降低高度。

11:14，机组宣布燃料将尽，只好迫降，并指导大家正确掌握应急着陆时的动作要求，鼓励大家镇静。临窗下望，是莽莽雪原，正驾驶员宣布已选择下前方一个带状小湖作为迫降点，他说估计附近最近的居民点当在着陆点西北方 35km 处。11:32，飞机在小湖水面上硬着陆，湖面冰层撞裂，正副驾驶员当场不幸身亡，飞机在 63s 后沉入湖底。万幸 12 名旅客无一伤亡，并都及时安全逃离飞机跨上湖岸，衣着未被打湿。惊魂未定的 12 名幸存者发现所在之处是一片丘陵，散布有一丛丛灌木，很少见乔木。地面覆盖着白雪，高处雪及踝部，低处雪深齐膝，且有多个长条状小湖或小河，水面冻结成冰。当时有薄云遮日，有时转阴。其中有人在登机前从广播听了天气预报说这一带近日气温最高是零下 25℃，晚间有北风五级左右，最低是零下 40℃。所有旅客身穿的全都是北方城市里的一般防寒服，没料到要在野外过夜。飞机上有 12 件物品可以随身带走，这 12 件物品是，磁罗盘、航空地图、手枪、巧克力糖、没有汽油的打火机、一摞报纸、一瓶烧酒、一把手斧、一桶猪油罐头、一捆毛线、几件内衣裤、一张 6m×6m 的厚帆布。假设你是这 12 名旅客之一，你将如何决策，你认为这 12 件物品中最重要的是哪几件？

当时在示范教学现场，代表们组成了三个决策小组，分别提出了一个方案，他们的方案如下：

方案 1：全体人员尽快向西北方向的村庄前进 35km，距天黑还有 7 个小时左右时间，争取天黑前赶到，准备打火机照明。因此物品的优先顺序是磁罗盘、航空图、打火机、手枪、巧克力糖、报纸等。

方案 2：多数人员向西北方向的村庄前进，个别走不动的原地待援；走的人带着磁罗盘、航空图、手枪、巧克力糖、烧酒；给原地待援的人留下手斧、猪油罐头、厚帆布等。

方案 3：少数身强力壮的向西北方向的村庄前进，多数原地待援；走的人带着磁罗盘、航空图、打火机、烧酒、手枪、毛线、报纸等；给原地待援的人留下巧克力糖、手斧、厚帆布等。

三个组的代表分别就上述三个方案，在大会上进行了说明，三个组都认为当前存在着死亡的危险，必须尽快脱离危险，脱离危险的唯一办法是到 35km 外的村庄求救。

作者当时在课堂现场，请求发言，获得同意后，在大会上做了如下发言：

认为当时最重要的问题是生存，而生存最主要的危险是寒冷和无望，至于饥饿、野兽等危险则在其次。但向西北方向村庄走的人，只能是死路一条。

北方中俄边境大约是北纬 50° ~ 55°，元月份太阳光照时间很短，下午至多只有三四个小时，不可能有 7 个小时左右的白昼；再说，零下 24°到零下 40°的严寒，和深及 10cm ~ 40cm 的积雪和小湖河，对于身着普通防寒服的旅客来说，都是难以克服的客观条件；况且估计西北方向有个村庄是不准确的消息，因为飞机已迷航了一段时间，而航行地图对于地面交通来说是不适用的；烧酒是不可能给人补充热量的，只能加快人体热量的散失。要想有生路，只能全体留下。

留下的人若无作为，也只能是死路一条。

首先在飞机失事时，要稳定情绪，发出求救信号。因为他们乘坐的是民航班机，从上午 9:03 与基地失去联络到现在 12:35，时间已过了 3 个半小时，民航部门与各级政府以及附近的村庄正在行动起来进行搜救，只要尽快发出信号，就会有获救的希望。所以最重要是发出信号，同时要战胜严寒。为达到这一目的，最有效的办法就是尽快燃起篝火，既能报警，又能取暖，还能吓跑野兽，12 件物品都可能对救命有用，集中起来，统一使用，等待救援。这时候，要有一位强势人物，控制局面。

稳定情绪以后，立即组织年轻力壮的人员干 4 件事：

第一件事取火。第一个方案，用手斧在湖面上取一块被飞机撞碎的冰块，一米见方，切削成一个凸透镜，中间厚达 20cm，下午 1:00 前完成，立即架起来，将报纸沾烧酒放焦点处，向太阳聚焦取火。下午 1:00 左右，薄云遮日，或许成功。第二个方案。烧酒滴在打火机内，打火点燃报纸。第三个方案，手枪向沾着烧酒的毛线射击，然后点燃报纸。或者，三个方案同时进行。

第二件事砍柴。手斧砍灌木，轮流作业，在落日前的 2h 内，提供尽可能多的木柴，部分作为燃料，部分作为休息场地的铺垫。

第三件事搭帐篷。用粗毛线把灌木扎成扫把，打扫出 6m × 6m 积雪，底下铺上灌木枝，上面盖上帆布，用毛线将帆布固定在灌木根基部，周围以灌木枝遮蔽挡风。

第四件事维持篝火。所有人员进入帐篷，轮流出去砍柴填薪，使篝火旺盛，互救自救、互相鼓励，等待救援。

8.2 系统决策概述

8.2.1 系统决策的概念

下面几节讨论决策的概念以及常用的决策树方法。

决策是人类社会中不可缺少的一种实践活动，决策这一实践活动遍及人类社会的所有领域。

什么是决策？通俗地说，决策就是针对问题"做出决定"。这是一种非常概括笼统的说法。运筹学中曾将决策定义为："决策是针对某个问题，为了实现一个目

标或一组目标，从可实现该目标且可以互相更换替代的行动方案中，选定一个最合适方案的行为。"以上定义的决策，可以看作为狭义的决策含义[2-4]。

广义的决策定义应理解为"决策是一个过程"。这个过程大体包括以下几个主要阶段，即提出决策问题、探查环境条件，确定决策目标，创造、制定和分析可能采取的行动方案，从多个可行的方案中，根据对各方案的后果的预估和评价，选出一个特定的行动方案，并对决策的执行结果进行评审。这实际上就是第一章所讨论的系统工程方法论的基本逻辑程序框。

在古代，决策者所作的决策属于经验决策。随着科技的发展，在信息化条件下，要想对一个需要决策的问题给出正确的决策，有三个条件是必须具备的，一是决策者要获得及时准确的信息，二是决策者要掌握相关事物发展变化的规律，三是决策者要遵循一定的决策程序。可见，决策是决策者的事情，为了提高决策的水平，克服和弥补经验决策的局限性，在重大问题的决策前，迫切需要"智囊机构"，运用系统工程和系统分析的理论与方法，为决策者提供辅助决策支持，使决策更加规范、更加合理、更容易实施。

8.2.2 决策树

如前所述，决策是一个过程，决策依据对未来情况的预测和判断，但是对未来情况的预测和判断可能不准确，或者后来实际情况与原来的预测和判断完全相反，这就会出现风险。决策者为了应对这种情况的发生，必须分析未来可能出现的各种情况，以及各种情况可能发生的概率，以便最大限度地回避风险。下面分几种情况讨论。

1. 状态概率已知的风险型决策

风险型决策是指决策者对所面临的决策环境不是完全确定地掌握，事件可能出现的状态不只一种，而是两种或两种以上；但是，决策者对即将发生的各事件状态和后果的概率是已知的，或可通过实验等获取进一步信息而得知。由于这种情况下的决策要冒一定的风险，所以称它为风险型随机型决策或统计型决策[2-4]。先讨论无实验时的风险型决策问题，即将发生的各事件状态和后果的概率为事先已知的情形。

[**例 8.3**] 某研究所设计了一种新式武器准备投入生产，现有两种方案：一是建设较大的厂，需投资 300 万元，建成后如大量装备部队，每年可获利润 100 万元，如少量装备部队，要亏损 20 万元；二是建设较小的厂，需投资 180 万元，建成后如大量装备部队，每年可获利润 40 万元，如少量装备部队，可获利润 30 万元。两种方案的使用周期都是 10 年。根据军事专家预测，这种武器在今后 10 年内大量装备部队的概率是 0.7，少量装备部队概率是 0.3，问应该采取何种方案。

解：我们用期望（决策后果）值法，决策后果值也称为效益值。先将该决策问

题列成一个表格，称之为决策矩阵，见表 8.1，其中效益值用利润表示。

表 8.1 决策矩阵表

利润 $g(a_i,\theta_j)$ 状态 θ_j 方案 a_i	θ_1（大量装备）	θ_2（少量装备）
	$P(\theta_1)=0.7$	$P(\theta_1)=0.3$
a_1（建大工厂）	100	-20
a_2（建小工厂）	40	30

$E(a_1)=g(a_1,\theta_1)\times P(\theta_1)+g(a_1,\theta_2)\times P(\theta_2)-30=100\times 0.7+(-20)\times 0.3-30=34$（万元）

$E(a_2)=g(a_2,\theta_1)\times P(\theta_1)+g(a_2,\theta_2)\times P(\theta_2)-18=40\times 0.7+30\times 0.3-18=19$（万元）

显然，$E(a^*)=\max\limits_j E(a_j)=34$。可见，由期望值法决策的结果是选择方案 a_1，即建大工厂预期利润可达 34 万元。这可以用如图 8.3 所示的决策树来表示。

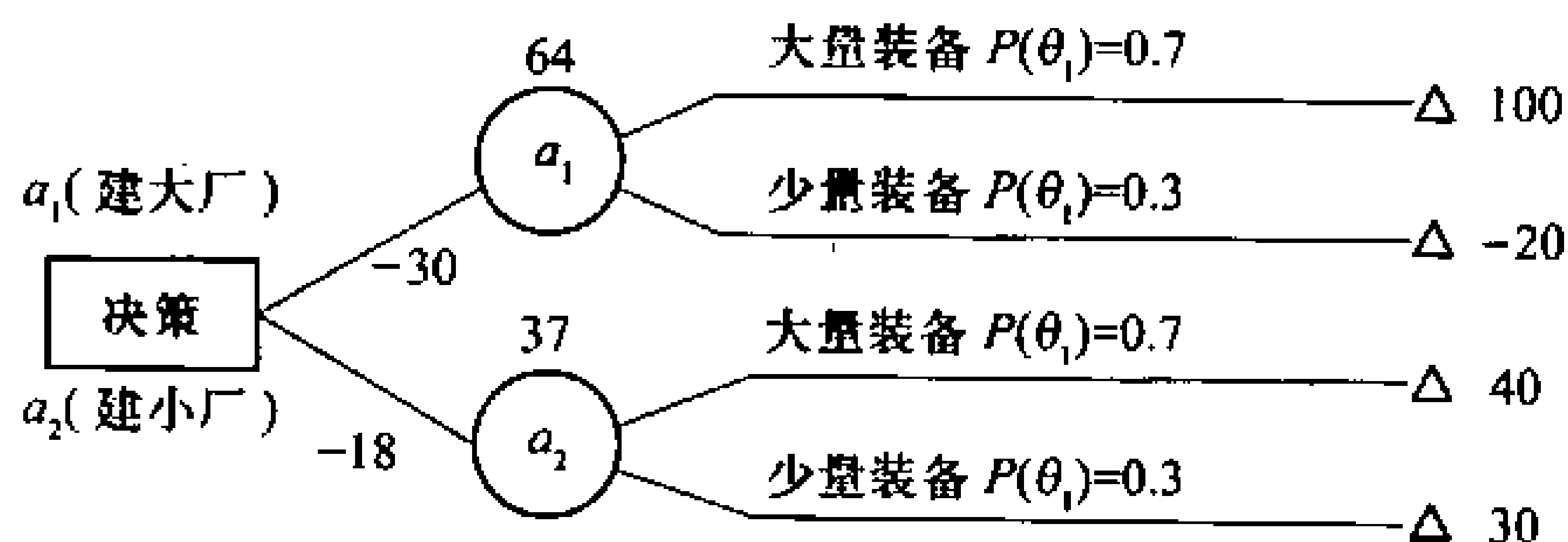


图 8.3 建某种武器工厂的决策树

2. 基于期望效用值的风险型决策

在决策活动中，人们对决策后果值的态度是不同的，这是由于人们对后果值的偏好不同所致，从而使得不同的决策者对各决策后果有不同的效用值。“效用”这个概念首先是由贝努利（D. Berneulli）提出的，原意是指人们对其拥有钱财真实价值的态度，系新古典学派的经济学术用语。在决策理论中，冯·诺伊曼和摩根斯特恩（Von Neumama-Morgenster）用它来度量人们对风险条件下决策后果值（效益值）的偏好态度，即后果的价值。效用具有主观特性，可通过心理测验来确定。下面看一个例子。

[**例 8.4**] 讨论指挥员定下决心的问题。假定战场态势顺利情况的概率为 0.7，意外情况的概率为 0.3。现有两个作战方案 A 和 B，方案 A 在顺利情况下可推进 8km，而意外情况下将后退 3km；方案 B 在顺利的情况下可推进 5km，而意外情况下将原地不动。问指挥员应选哪个方案？

分析：为解决这个风险型决策问题，需要先测定指挥员的效用函数的曲线。由效益值的取值范围可确定：$u(8\text{km})=1$，$u(3\text{km})=0$。而后通过与当事人对话可得

到他的一系列效用值，从而确定其效用曲线，即得当事人的效用函数。由此可知该指挥员关于决策后果的效用值，如表 8.2 所列。

表 8.2 决策矩阵表

效用值 u 状态 θ_j 行动方案 a_i	θ_1（大量装备）	θ_2（少量装备）
	$P(\theta_1)=0.7$	$P(\theta_1)=0.3$
A	$u(8)=1$	$u(-3)=0$
B	$u(5)=0.875$	$u(0)=0.375$

不难求得方案 A 与 B 的期望效用值：

$E(u(A))=u(A,\theta_1)\times P(\theta_1)+u(A,\theta_2)\times P(\theta_2)=1\times 0.7+0\times 0.3=0.7$

$E(u(B))=u(B,\theta_1)\times P(\theta_1)+u(B,\theta_2)\times P(\theta_2)=0.875\times 0.7+0.375\times 0.3=0.725$

按最大效用值准则可知 B 方案优于 A 方案。

如果用推进距离最大作为准则，那么，A 方案的推进距离期望值为 4.7km，而 B 方案为 3.5km。因此，方案 A 优于 B。然而这是不符合该指挥员的谨慎态度的。

3. 序列决策

序列决策也是风险决策的一种，它的特点是各种方案及其后果不是一个层次的简单决策，而是具有多个层次、能够分枝的多级决策，它难以用一张决策矩阵表来表达，但可用决策树或影响图这类工具进行决策。

[例 8.5] 如图 8.4 所示，有一批军用物资要求用最短的时间，从出发地运到前沿，可供选择的路有 A、B、C 三条公路。沿公路 A 需用时 4h，但在离出发地 2h 处有一座桥，桥被敌机破坏的概率为 0.5。沿公路 B 需用时 3h，但在离出发地 1h 处也有一座桥，桥被敌机破坏的概率为 0.4。沿公路 C 需用时 5h。如遇桥被破坏，则立即返回出发地，选另外两条路，仍有其他路上桥被破坏的情况。试画出决策树，并选最优方案。

分析：这是一个抢运道路选择问题，用决策树法分析这个问题的步骤如下：

(1) 绘制决策树。绘制时，对各节点标注相应的符号。参见图 8.5，图中小写字母 o、d、e 为决策方案节点，字母 a、b、c、f、g 为状态概率分枝节点，图右面符号 Δ 表示终端节点。在决策方案分枝旁注明方案名；在状态概率分枝旁注明状态名及发生概率。

(2) 应用反向归纳法。从右到左，计算各方案节点的期望效益值并写在方案节点上方。

若选择先走公路 A，首先计算 A 分枝的各终端节点的期望效益值，遇到 A 桥好，可用 4h 到达目的地；如遇到 A 桥坏，返回到出发地，有两种选择：若选择走公

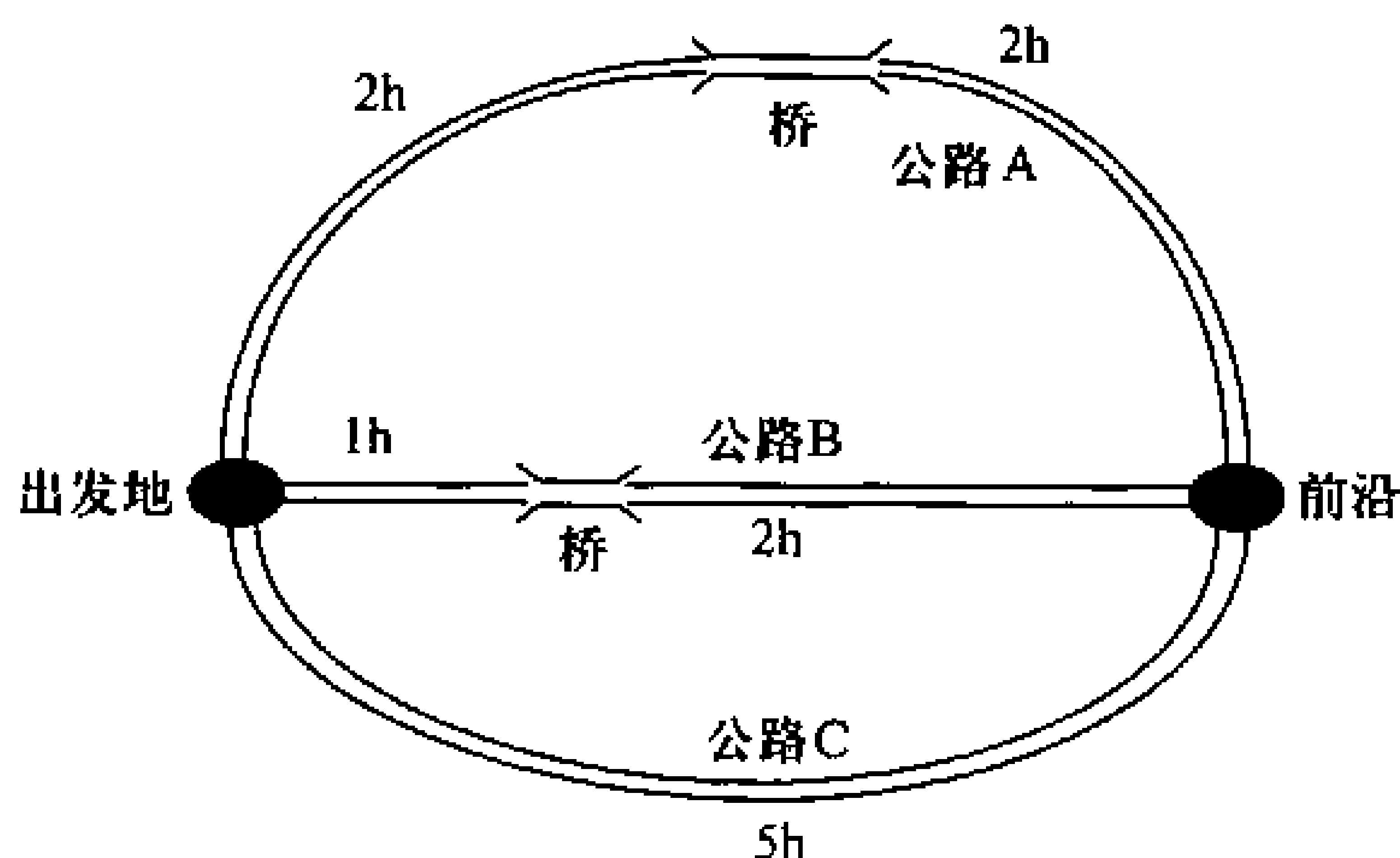


图 8.4 军用物资运送路线示意图

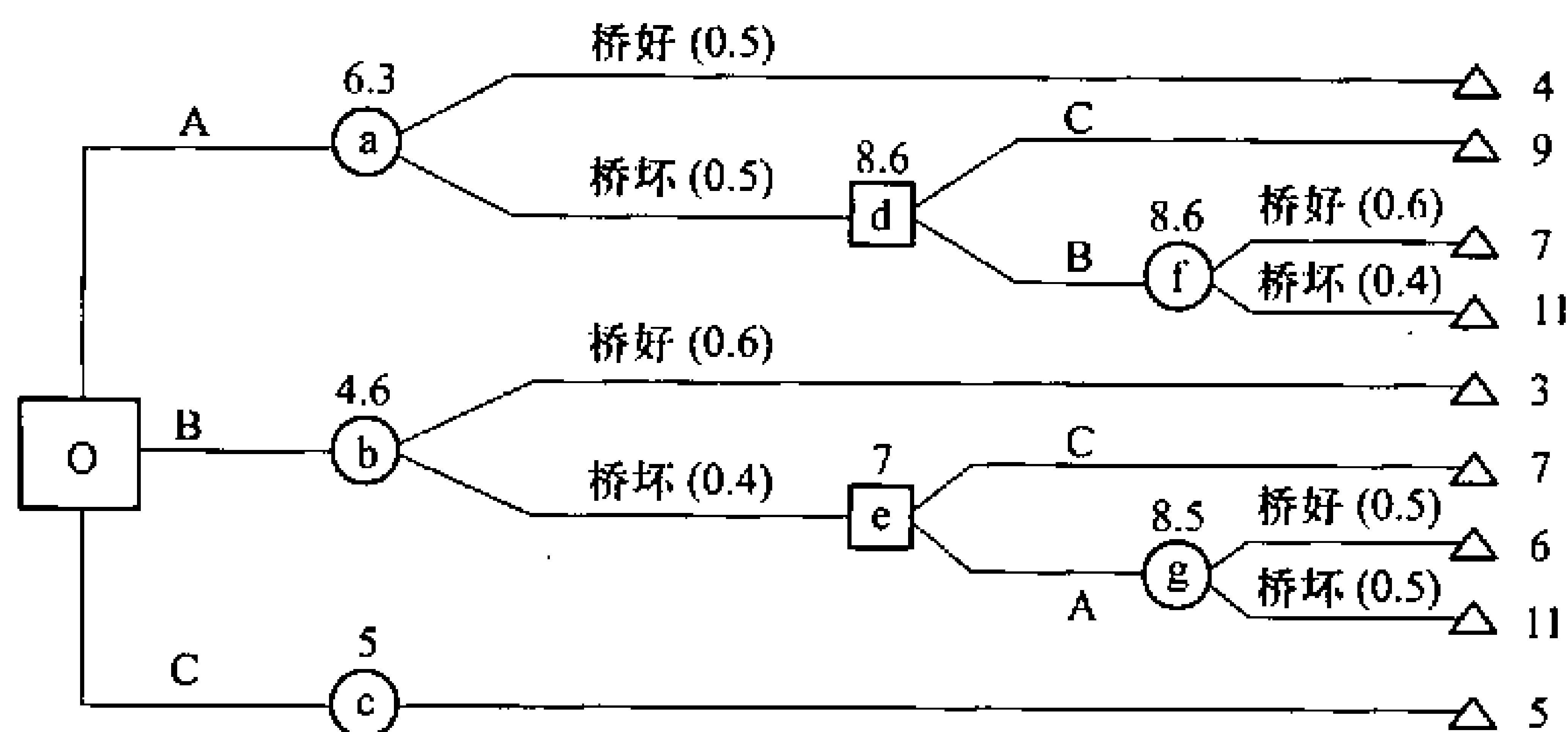


图 8.5 抢运道路选择决策树

路 C，可用 9h 到达目的地；若选择走公路 B，如遇到 B 桥好，可用 7h 到达目的地；如遇到 B 桥坏，只有返回走公路 C，可用 11h 到达目的地。将各方案的所用时间作为期望效益值写在终端节点符号 Δ 的右侧。

然后，计算各方案的期望效益值，先计算节点 f 的期望益损值：

$7\times0.6-11\times0.4=8.6(h)$

下一步，计算节点 d 的期望益损值，比较由 d 发出的两个决策方案的期望效益值，得到节点 d 处的期望益损值为 8.6h。

最后，计算节点 a 的期望效益值：

节点 a 处：$4\times0.5-8.6\times0.5=6.3$h。

采用同样的方法，把选择先走公路 B、选择先走公路 C 的情况，加以分析，将节点 b 处、节点 c 处的期望效益值写在各自的上方，如图 8.5 所示。

比较三处节点的期望益损值，得 $b<c<a$。

由以上分析和计算表明，从决策点 o 出发，选择线路 B 的期望益损值最小，即运送到前沿的时间最短为 4.6h。因此，从运送时间期望值方面考虑，应该选择 B 路线。选择 B 路线时，若遇桥损坏，立即返回选择 C 路线。

以上只是根据已知桥被破坏的概率的情况下，在所做的分析，实际情况要复杂得多。

［例8.6］ 某师指挥员要定下是否单独组织二梯队团进行反冲击的决心。如命令二梯队团组织反冲击，可能损失200人；反冲击有60%可能成功，40%可能失败。如成功，则下一步有两种打法：一是原地待援，巩固阵地，成功概率50%，可能损失180人；二是继续进攻，把口子堵上，成功概率80%，可能损失280人。如果第二步成功，敌人将损失700人；如果第二步不成功，敌仅损失100人，反冲击部队还将损失150人。假设以敌我损失人数之差作为评价标准，问是否应当组织反冲击？

分析：这是一个两级决策问题，用决策树法分析这个问题的步骤如下：

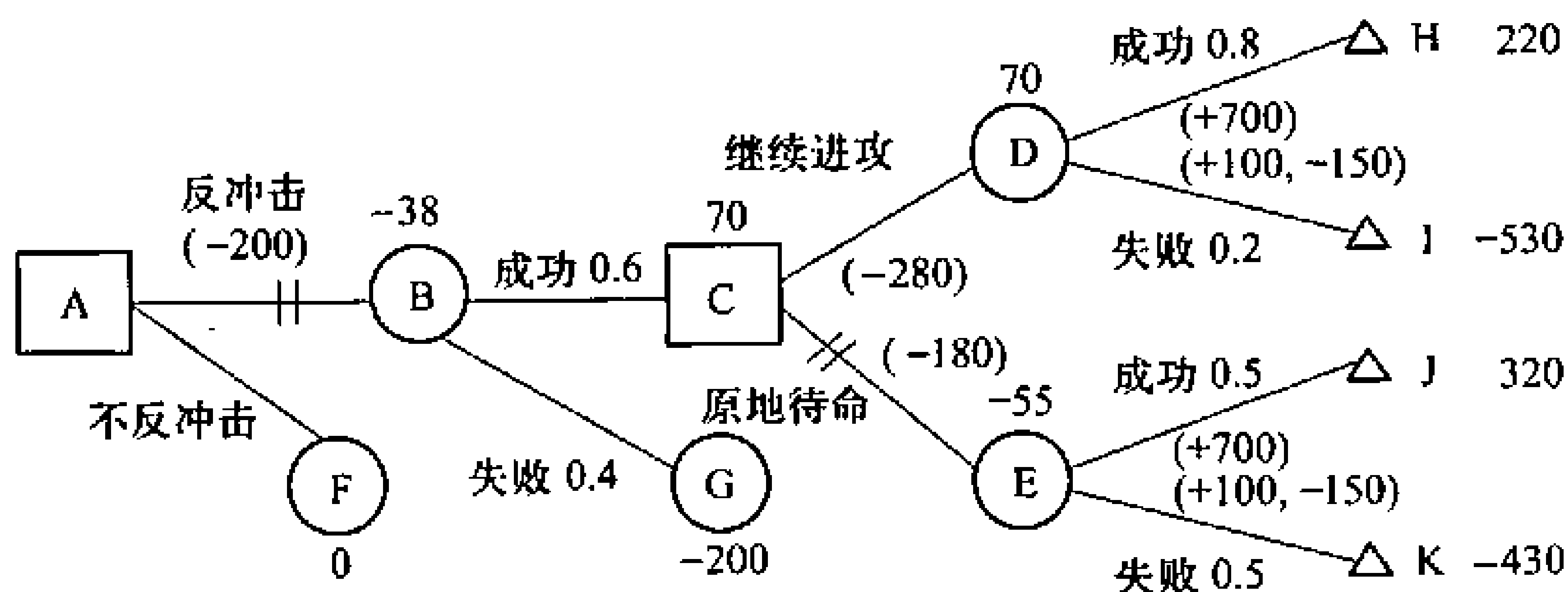


图8.6 二级决策树

(1) 绘制决策树。绘制时，各节点标注相应的表示顺序的符号。参见图8.6。A、C为决策节点，B，F，G，D，E是方案节点，H，I，J，K是终端节点。在方案分枝旁注明方案名；在状态分枝旁注明状态名及发生概率。

(2) 应用反向归纳法，从右到左，计算各方案节点的期望效益值，并写在方案节点上方，选择其中最大值，写在决策节点上方，被舍弃的方案附以“≠”符号表示。

决策过程如图8.6所示。

首先计算H、I、J、K的期望效益值分别为220人，-530人，320人，-430人。

接着计算D、E两处的期望益损值：

D处：$220 \times 0.8 - 530 \times 0.2 = 70$ 人

E处：$320 \times 0.5 - 430 \times 0.5 = -55$ 人

比较D、E两处的期望益损值，可知决策节点C应采取继续进攻方案，因此C点期望效益值为70。

接下去，计算B点的期望效益值：

$$70 \times 0.6 - 200 \times 0.4 = -38 \text{ 人}$$

这表明，从决策节点A出发，如反冲击，敌、我损失人数差的期望值为-38人；

而如不反冲击，则敌、我人员均不损失。所以从敌、我损失对比角度考虑，师指挥员要定下决心，不单独组织反冲击。

从以上分析可以看到，选择哪一个方案，关键取决于评价标准。

8.3 多目标决策

关于多目标决策，在前面的章节中，已经接触到，这里再从决策的角度加以讨论。在决策过程中，对决策方案的评价经常需要考虑多方面的要求，按多个目标或多个准则进行综合衡量。例如制定作战方案，既要按时攻占指定阵地，又要给敌人以最大杀伤，还要自己伤亡消耗最少等。这就需要解决多准则（又称多目标）决策问题。事实上，实际的决策问题很少是单目标的情况。由于决策准则的多目标性带来方案间的冲突，使决策者难以决断，这使得应用各种决策辅助方法进行科学有效决策成为必要。

一般地，多目标决策问题由下述四个基本要素构成[2-4]：

（1）行动方案。行动方案集合 X，包含了指挥员所有可能采取的行动方案。不管方案集合 X 是有限的还是无限的，都要求其中的各个方案之间相互独立，而又能彼此相互替代。

（2）目标和属性。目标是关于被研究问题中指挥员所希望达到的某种状态的陈述。在多目标决策问题中，有若干个陈述来表达指挥员希望达到的状态。为了用一个可测量的量来反映特定目标被达到的程度，对于每个目标设定一个属性。可能存在既便于测量又能间接地反映目标达到的程度的属性，这种属性称为代用属性。每个目标的属性都具有可理解性和可测性。可理解性，是指某一属性的值足以标定相应的目标被达到的程度。可测性，是指对给定的方案能按照某种标度对该属性赋值。

（3）行动方案的属性值。它定义了对每一个行动方案 $x \in X$，属性集 $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \cdots, f_n(x))^T$ 的取值情况。

（4）偏好结构和决策规则。由于人类行为的复杂性，目前还没有提出并形成统一的能描述人类决策行为的理论和方法。目前有 3 种描述决策者行为即“偏好”的基本模式。

第一种是基于简单的次序关系。它认为如果一个方案 x^* 是好的方案，那么就不存在别的方案 x 使得方案 x 的每个属性值均不劣于方案 x^* 的相应属性，且至少有一个属性值优于方案 x^* 的相应属性值。这种模式导致了著名的 Pareto 最优性。

第二种基本模式是基于人们实际所追求的是一定限度的目标，这种模式导致满意解和调和解的概念。

第三种基本模式是基于价值或效用极大化的概念,这种模式导致了现代效用理论。因此,基于不同的描述指挥员的行为模式,形成了不同的多目标决策概念和技术。

与单目标决策不同,多目标决策问题最显著的特点是目标之间的不可公度性和目标之间的矛盾性。目标之间的不可公度性,是指各个目标没有统一的度量标准,因而难于比较。目标之间的矛盾性是指如果去改善某个方案中某个目标的值,可能会使该方案中另一目标的值变坏。由于多目标决策问题中多个目标之间的矛盾性和不可公度性,一般来说,不能把多个目标直接归并为单个目标,再采用解决单目标决策问题的方法去解决多目标决策问题。必须根据多目标决策问题的特点,去研究求解它的基本理论和方法。

多目标决策的过程是指解决多目标决策问题的一种规范的方法和过程,它包括由多目标决策问题的提出、建立决策问题模型、分析评价、问题求解直至实施的全过程。如同前面所述的系统工程方法论的基本逻辑程序框,大致可分为如下步骤:①明确决策问题。②建立决策问题的模型。③进行分析和评价,对各备选方案进分析比较与评价,并按决策者的偏好,制定决策规则,从而把所有行动方案排列出一个优劣顺序。最后将最好的方案作为决策建议呈交给决策者。④进一步评价与决策建议的采用。决策者对给出的决策建议可能满意,也可能不满意。如果满意,将决策方案付诸实施。否则,通过修改模型,扩充方案集、修订决策目标,重新构造多目标决策问题,形成一个闭环的过程。

多目标决策问题中的一类重要问题就是向量优化问题。对向量优化问题的“解”引入了新的更具有广泛意义的概念,这就是用“有效解”去代替最优解,这在前面我们已介绍过。求解向量优化问题就是指求出向量优化问题的有效解,也被称为非劣解。下面我们通过计算实例来讨论几种具体的多目标决策的评价方法及其应用。

1. 简单加权法

[**例 8.7**] 为了提高武器装备保障能力,某部门决定采购一批战斗机。现有 4 种机型可供选择,决策者根据战斗机的性能和费用,考虑了 6 项评价指标,其决策矩阵 D 见表 8.3。

表 8.3 多目标决策矩阵表

指标 f_j / 方案 A_i	最大速度 /Ma	飞行范围 /km	最大负载 /磅	采购费用 /10^6 美元	可靠性 (高—低)	灵敏度 (高—低)
A_1	2.0	1500	20000	5.5	一般	很高
A_2	2.5	2700	18000	6.5	低	一般
A_3	1.8	2000	21000	4.5	高	高
A_4	2.2	1800	20000	5.0	一般	一般

据此,要选出最优决策方案。

分析:在这里先应用简单加性加权法给出该多目标决策问题的优选方案。为此,需先对第5个指标(可靠性)和第6个指标(灵敏度)的模糊指标值进行量化处理,这两个都是效益型指标,按10分制整数值取法,可得表8.4。

表8.4

方案 A_i \ 指标 f_j	可靠性 f_5	灵敏度 f_6
A_1	5	9
A_2	3	5
A_3	7	7
A_4	5	5

此时,易见各方案均是多目标决策问题的有效解。一般情况下,开始时,如果不知道各方案是否都是有效解,首先经过淘汰劣解,留下非劣解这一步骤。为讨论问题方便,以下假定各方案都为非劣解。然后,对各量化指标值进行标准化处理。其中第4个指标是成本型指标,采用:$r_{i4}=\dfrac{u_4^*}{u_{i4}}$,这里 $u_4^*=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant 4}(u_{i4})$,而 u_{ij}(这里 $j=4$)是指方案 i 对第 j 个目标的原始的量化指标值。其余各指标都是效益型指标,可用公式:$r_{ij}=\dfrac{u_j^*}{u_{ij}}$,其中 $u_j^*=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant 4}(u_{ij})$,$i=1,2,3,4,j=1,2,3,5,6$,从而可得

$$
\begin{matrix} & f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 & \\ R= & \left(\begin{matrix} 0.80 & 0.56 & 0.95 & 0.82 & 0.71 & 1.00 \\ 1.00 & 1.00 & 0.86 & 0.69 & 0.43 & 0.56 \\ 0.72 & 0.74 & 100 & 1.00 & 1.00 & 0.78 \\ 0.88 & 0.67 & 0.95 & 0.90 & 0.71 & 0.36 \end{matrix}\right) & \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix} \end{matrix}
$$

假定决策者认为这6个评价指标的优先权重为

$$\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}=(0.2,0.1,0.1,0.1,0.2,0.3)$$

容易算出

$$a_2=0.709,a_3=0.852,a_4=0.738$$

有 $a_2<a_4<a_1<a_3$

则有 $A_1<A_2<A_3<A_4$

于是,得最优方案为 $A^*=A$,即第三个方案为最优方案。

2. 理想点法

[例8.8] 采购一批战斗机问题。假定与前一题相同,其原始决策矩阵为

$$\begin{array}{cc} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & f_3 & f_4 & f_5 & f_6 \end{matrix} \\ D=(u_{ij})_{4\times 6}= & \begin{pmatrix} 2.0 & 1500 & 20000 & 5.5 & 5 & 9 \\ 2.5 & 2700 & 18000 & 6.5 & 3 & 5 \\ 1.8 & 2000 & 21000 & 4.5 & 7 & 7 \\ 2.2 & 1800 & 20000 & 5.0 & 5 & 5 \end{pmatrix}\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{matrix}\end{array}$$

第一步 计算标准化矩阵：$\boldsymbol{R}=(z_{ij})_{m\times n}$

其中 $z_{ij}=u_{ij}\Big/\sqrt{\sum_{i=1}^{m}u_{ij}^2}\ (i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$，

例如 $z_{25}=\dfrac{3}{\sqrt{5^2+3^2+7^2+9^2}}=0.2881$。

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} 0.4671 & 0.3662 & 0.5056 & 0.5063 & 0.4811 & 0.6708 \\ 0.5839 & 0.6591 & 0.4550 & 0.5983 & 0.2881 & 0.3727 \\ 0.4204 & 0.4882 & 0.5308 & 0.4143 & 0.6736 & 0.5217 \\ 0.5139 & 0.4392 & 0.5056 & 0.4603 & 0.4811 & 0.3727 \end{pmatrix}$$

第二步 计算加权标准化矩阵：$\boldsymbol{V}=(x_{ij})_{m\times n}$，其中 $x_{ij}=w_jz_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$，上式中 $w_j(j=1,2,\cdots,n)$ 是第 j 个指标的权重。

$$\boldsymbol{V}=\begin{pmatrix} 0.0934 & 0.0366 & 0.0506 & 0.0506 & 0.0962 & 0.2012 \\ 0.1168 & 0.0659 & 0.0455 & 0.0598 & 0.0577 & 0.1118 \\ 0.0841 & 0.0488 & 0.0531 & 0.0414 & 0.1347 & 0.1565 \\ 0.1028 & 0.0439 & 0.0506 & 0.0460 & 0.0962 & 0.1118 \end{pmatrix}$$

第三步 确定理想解和负理想解。

理想解：$x^*=\{0.1168,0.0659,0.0531,0.0414,0.1347,0.2012\}$

负理想解：$x^-=\{0.0841,0.0366,0.0455,0.0598,0.0577,0.1118\}$

第四步 计算距离。

(1) 各解距理想解 x^* 的距离分别为

$$S_1^*=0.0545,S_2^*=0.1197,S_3^*=0.0580,S_4^*=0.1009$$

这里 $S_i^*=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-x_j^*)^2}\ (i=1,2,\cdots,m)$。

(2) 各解距负理想解 x^- 的距离分别为

$$S_1^-=0.0983,S_2^-=0.0439,S_3^-=0.0920,S_4^-=0.0458$$

这里 $S_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(x_{ij}-x_j^-)^2}\ (i=1,2,\cdots,m)$。

第五步 计算每个解对理想解的相对贴近度：

$$C_i^*=\frac{S_i^-}{S_i^*+S_i^-}(i=1,2,\cdots,m)$$

$$C_1^* = 0.643, C_2^* = 0.268, C_3^* = 0.613, C_4^* = 0.312$$

第六步　排列决策方案的优先次序：按由小到大的顺序排列。

因为　　$C_2^* < C_4^* < C_3^* < C_1^*$

所以　　$A_2 < A_4 < A_3 < A_1$

得最优方案为 $A^* = A_1$。

以上讨论了比较常用的决策方法（或称决策准则），在实际工作中不可能找到一种十全十美的方法，因此要根据实际情况的需要来选用。决策分析一个重要组成部分是群决策的理论与方法，这里不再介绍，有兴趣的读者可参阅相关著作。

参考文献

[1] 赫伯特·西蒙.管理行为[M].4版.北京:机械工业出版社,2007.

[2] 陈廷.决策分析法[M].北京:科学出版社,1987.

[3] 齐演峰.多准则决策引论[M].北京:兵器工业出版社,1989.

[4] 徐南荣,仲伟俊.科学决策理论与方法[M].南京:东南大学出版社,1995.

[5] 梁润果,高峤,李双阁.ABC分类法在军械维修器材仓库管理中的应用研究[J].物流技术,2004(8):60-61,67.

[6] 刘志勤,王兴录.战时装备保障概论[M].北京:军事科学出版社,2002.

[7] 潘晓雯.浅谈大学生思想信息的收集和处理[J].南通师专学校学报,1997(3).

[8] 王学义,孙德宝.部队装备保障能力评价研究[J].军械工程学院学报,2002,14(1):42-46.

[9] 徐强.浅谈高等教育评价多元化[J].江苏高教,1997(4).

[10] 周涛,等.物流企业绩效评价体系及模糊综合评判[J].管理现代化,2002(5).

[11] 李元左.关于广义判断下的AHP法[J].系统工程理论与实践,1994(3):8-16.

[12] 李元左,邱涤珊.基于广义判断形式的模糊排序方法[J].模糊系统与数学,1997(4):65-70.

第9章　系统工程案例

本章遴选了11个例子，希望能够通过这些例子的分析，加深对系统工程和系统分析的理解。其中有些例子是系统工程的经典案例，有些则是本书作者在系统工程实践中遇到并研究解决的实际问题。

9.1 "曼哈顿"计划

美国陆军部于1942年6月开始实施的利用核裂变反应来研制原子弹的计划，亦称"曼哈顿"计划。为了先于纳粹德国制造出原子弹，该工程集中了当时西方国家(除纳粹德国外)最优秀的核科学家，动员了10万多人参加这一工程，历时3年，耗资20亿美元，于1945年7月16日成功地进行了世界上第一次核爆炸，并按计划制造出两颗实用的原子弹。整个工程取得圆满成功。在工程执行过程中，负责人格罗夫斯和奥本海默应用了系统分析的思路和方法，大大缩短了工程所耗时间。这一工程的成功促进了第二次世界大战后系统工程的发展[1]。

"曼哈顿计划"动员了25000名各种专业的科学家和工程师，组织12000名工人进行全面合作，用了三年半的时间完成了这项工作。组织这么多人，进行这种史无前例的工作是很困难的。奥本海默在执行计划的过程中，从整体出发，把研究课题分解成大量的小课题，组织很多小组负责各个课题的研究工作，同时他非常注重各课题之间的联系和它们之间的等级关系，使全部课题组合起来能达到整个计划的最优结构。在生产原子弹燃料这一中心项目上，奥本海默组织大家研究讨论，提出了六种方案，经过激烈的讨论，相持不下。他确定一个原则，首先要保证按时完成任务，其他皆是次要的。因此他根据可靠性理论中"可靠性低的原件可组成可靠性高的系统"的原理，决定六种方案同时试验，结果按时拿到了生产原子弹所需的铀。这说明奥本海默在组织这项计划时，时刻从系统的总目标出发来处理问题。

这项复杂的工程成了美国科学的熔炉，在"曼哈顿"工程管理区内，汇集了以奥本海默为首的一大批来自世界各国的科学家。科学家人数之多简直难以想象，在某些部门，带博士头衔的人甚至比一般工作人员还要多，而且其中不乏诺贝尔奖得主。"曼哈顿"工程在顶峰时期曾经起用了53.9万人，总耗资高达25亿美元。这是在此之前任何一次武器实验所无法比拟的。

"曼哈顿"计划不仅造出了原子弹，也留下了14亿美元的财产，包括一个具有

9000人的洛斯阿拉莫斯核武器实验室;一个具有36000人、价值9亿美元的橡树岭铀材料生产工厂和附带的一个实验室;一个具有17000人、价值3亿多美元的汉福特钚材料生产工厂,以及分布在伯克利和芝加哥等地的实验室。

当时,还没有“系统分析”一词,但奥本海默的工作却体现出系统方法的本质。国外都认为这是系统分析的起点。

9.2 “阿波罗”计划

“阿波罗”计划(Apollo Project),又称“阿波罗”工程,是美国从1961年到1972年从事的一系列载人登月飞行任务。它是世界航天史上具有划时代意义的一项成就。工程开始于1961年5月,至1972年12月第6次登月成功结束,历时约11年,耗资255亿美元。在工程高峰时期,参加工程的有2万家企业、200多所大学和80多个科研机构,总人数超过30万人。这个计划的成功,关键在于整个组织管理过程采用了系统分析的方法和步骤,其实施过程如下[2]。

1. 建立组织管理机构,明确职责分工

为了完成登月活动,首先确定所需的组织形式和管理原则。国家宇航局设立了“阿波罗”计划办公室主管全部工作,在该局附属的3个研究中心分别设立了“阿波罗”项目办公室,受该局设计办公室的领导,负责分管的任务。

2. 制定和选择方案

计划办公室成立后,首先为实现登月选择飞行方案,提供了4个备选方案。

(1) 直接起飞。由一个巨大的新星火箭携带一艘航天器,直接飞往月球;火箭在月球降落,任务完成后再次起飞,飞回地球。

(2) 地球轨道集合。需要发射两艘只有“土星”5号1/2大小的小型火箭将登月航天器的不同部分送人地球轨道,集合并对接。整个航天器降落在月球表面。

(3) 月球表面集合。需要发射两艘航天器,一艘自动航天器携带推进系统,先期登月,载人航天器晚些发射。推进系统在月球表面被移至载人航天器上,然后返回地球。

(4) 月球轨道集合。需要发射一艘较大的航天器,称为指令/服务舱,携带一艘装载航天员的登月航天器,称为登月舱。指令/服务舱携带从地球到月球并返回的燃料和生活必需品,以及进入地球大气层所需要的隔热板。进入月球轨道之后,登月舱与指令/服务舱分离,并降落在月球表面;指令/服务舱留在月球轨道。3名航天员中的1名留在指令/服务舱中。登月完成之后,登月舱重新起飞,与指令/服务舱在月球轨道集合,并返回地球。

系统工程人员对4个方案分别在技术因素、工作进度、成本费用和研制难易程度等方面权衡利弊。结果认为第4个方案能确保在最短期间内,最经济地完成

"阿波罗"计划的全部目标。飞船登月主要环节计划时间与实际时间的误差见表9.1。

表9.1 飞船登月主要环节计划时间与实际时间的误差

项目	计划	实际	相差
飞船发射	16日20时32分	16日20时32分	0min
进入飞向月球轨道	16日23时16分	16日23时16分	0min
进入绕月球的椭圆轨道	20日0时26分	20日0时22分	4min
登月舱进入接近月面轨道	21日2时10分	21日2时8分	2min
登月舱在月面登陆	21日3时19分	21日3时17分	2min
航天员走出登月舱踏上月面	21日13时19分	21日9时56分	3h23min
航天员回到登陆舱	21日15时42分	21日12时11分	3h31min
登月舱离开月面开始上升	22日0时55分	22日0时55分	0min
航天员进入返回地球轨道	22日11时56分	22日11时55分	1min
在太平洋中部着落	24日23时51分	24日23时50分	1min

3. 组织管理过程

飞行方案确定之后就开始其他的计划和管理工作。

(1) 确定该计划的基本要求。"阿波罗"计划采用了"工作细分结构"的系统分析方法。把整个计划由上而下逐级分成项目、系统、分系统、任务、分任务等6个层次。为了明确工程进度的要求,"阿波罗"计划采用了计划评审技术,以形成各主承包商与政府之间的进度管理系统。

(2) 性能监测。即按照"阿波罗"计划的基本要求,审查整个计划的进展情况。为了及时掌握整个计划的情况,要经常取得各职能部门的质量管理和进度的信息,在各职能部门制定了报告的具体要求,建立了"管理信息与控制系统"和一系列"设计审查及产品检查"制度。"管理信息与控制系统"将所需要的各种性能的信息绘成100张左右的图表,经过整理分析后,每月上报计划负责人,以使他能洞察全局,集中力量抓薄弱环节。在"阿波罗"计划的全部过程中,连续进行各种审查和检查,如初步设计审查、关键设计审查、设计鉴定审查、首次产品结构检查、飞行合格鉴定等。

(3) 分析评价。主要工作是对性能数据进行评价并归纳出必须及时采取行动的问题,向计划负责人报告。"阿波罗"计划中应用了成本相关分析法等,以便保持各个工作部门相互平衡和保证完成主要目标。成本相关分析法就是分析工作进度与成本费用之间的关系,以估计完成计划所需的总费用,它可用来比较几个主要承包商完成的工作量。

(4) 对系统的控制。研究计划往往会发生变化,因此必须进行系统地控制,以

保证全部计划的实现。凡是影响最终产品的形式、装配、功能等的变化，都必须由规定的某一级决策机构批准。如在结构上的改变，分别由办公室的结构控制委员会批准。为了控制成本，每个季度审查各个部分的实际成本，划出超支动向，查出薄弱环节，必要时调整财务计划。

总之，“阿波罗”计划的成功不是依靠所采用的管理系统和管理工具——计算机，而是运用了系统分析的方法使得整个系统达到了最优，从而顺利完成了计划。有关图片如图 9.1 所示。

图 9.1　飞船登月的有关图片

“阿波罗”飞船的登月成功，还证实了系统科学一个重要的命题——“综合即创造”。负责“阿波罗”计划实施的总指挥韦伯说过：“阿波罗计划中没有一项新发明的自然科学理论和技术，全部工作都是现有技术的运用，关键在于综合。”

日本一些专家参观了“阿波罗”计划中所采用的硬件设备和工艺后，均认为日本没有造不出来的东西。实现“阿波罗”计划所要求的 4 个主要系统技术即大型运载火箭、在宇宙空间飞行的飞船弹道线路分析、轨道测定系统以及通信系统，这些在 20 世纪 60 年代已达到成熟，但作为一种系统的思维方式和科学方法以及把它作为一个整体来处理计划、设计和管理的技术——系统分析，日本却不如美国。因此，即使日本政府做出登月计划的决策，也不可能实现这一计划。

9.3　中国载人航天工程

2008 年 9 月 25 日 21 时 10 分，中国“神舟”七号载人飞船在酒泉卫星发射中心成功发射升空。“神舟”七号载人航天飞行的圆满成功，标志着我国成为世界上

第三个独立掌握空间出舱关键技术的国家,"神舟"七号发射全过程如图 9.2 所示。

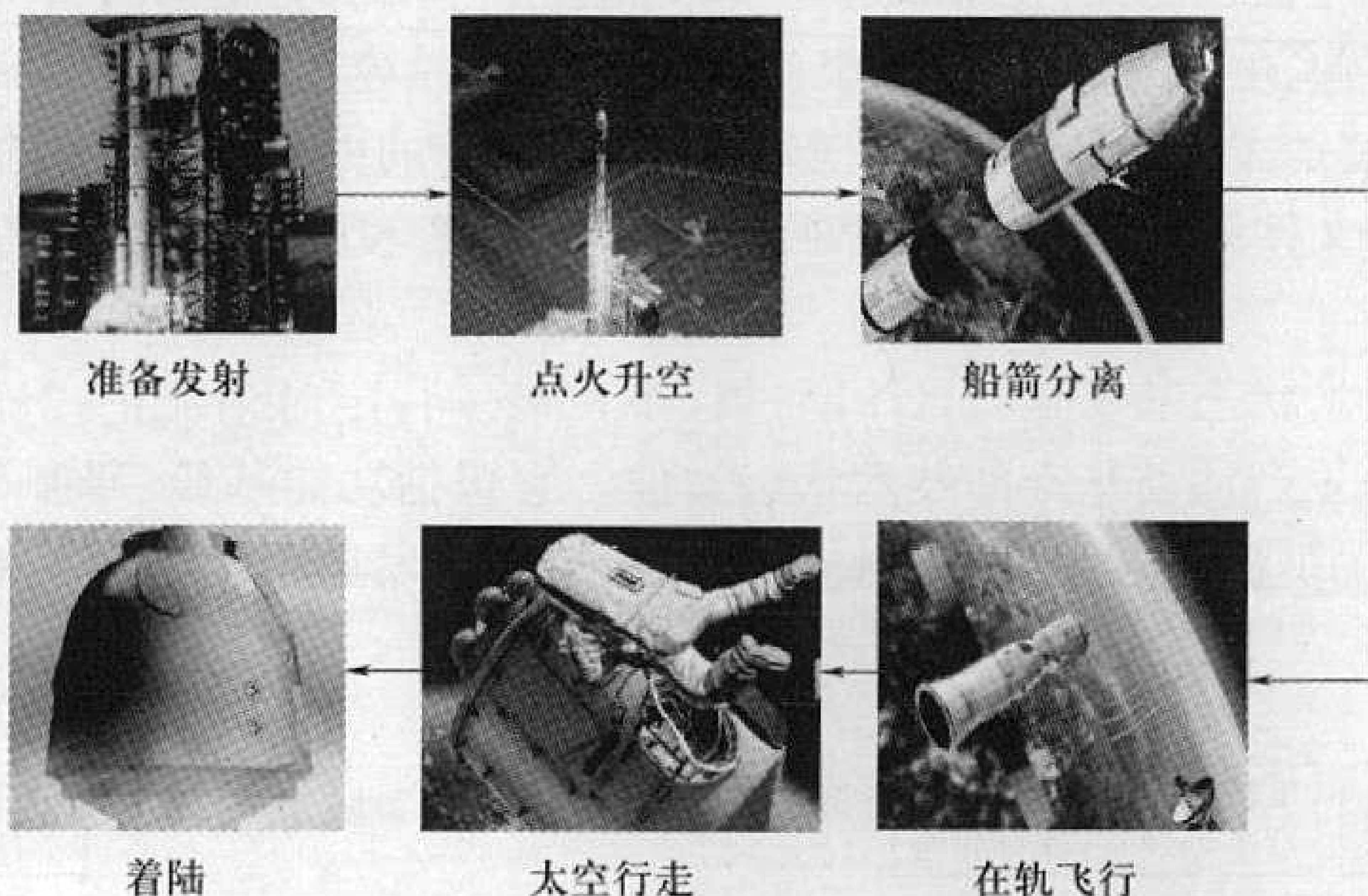


图 9.2 "神舟"七号发射全过程

载人航天工程是中国航天领域迄今规模最庞大、系统最复杂、技术难度大、质量可靠性和安全性要求最高、资金有限、极具风险性的一项跨世纪的国家重点工程。

如何从系统思维出发,将人(专家)、信息(流程)、机器(设备单机到元器件)等诸多体系结合起来,发挥综合优势、整体优势和智能优势,既超越局部得失,实现技术系统全局优化和管理系统全局统筹,又主动防范和化解风险;如何把比较笼统的初始研制要求,逐步落实到成千上万研制任务参与者的具体工作中,并使这些工作及其成果最终能够成为一个全面保证工程目标实现的实际系统,这是航天系统工程管理的出发点和落脚点。通过实践、认识,再实践、再认识,中国载人航天工程是实践系统分析的典范。

"神舟"飞船系统工程是在研究、吸收和借鉴国外系统工程管理先进经验基础上,经过不断开拓探索,确定的一套适合我国国情的系统工程管理体系,保证了载人航天任务的圆满完成。

"神舟"飞船在具体研制中,分别按飞船技术状态管理、飞船进度管理、飞船质量管理、飞船经费管理、飞船人力资源管理、飞船物资保障管理、飞船沟通与信息管理、飞船软件工程化管理、飞船风险管理、飞船可靠性安全性管理、飞船集成管理,以及飞船项目管理成熟度模型等 12 个方面来指导、管理和监督整个项目的实施。这里,仅就飞船技术状态管理和飞船进度管理两个方面进行讨论[3,4]。

1. 飞船技术状态管理(或称技术配置管理)

技术状态管理指的是:保证将用户对产品的功能、物理等特性的要求,反映到

产品的设计和生产中，并最终实现用户要求的一种技术管理方法。

将项目（产品或工程，这里指飞船）所要达到的功能特性和物理特性用技术文件予以规定的状态，就是技术状态。技术状态管理应从方案阶段开始，在产品设计、开发、采购、生产、试验、安装、服务、使用直到产品废弃处置的全生命周期内，应能准确、清楚地表明产品的技术状态，并对技术状态的更改进行有效的控制。项目技术状态的文件是规定技术状态项目的设计、生产和验证等要求所必需的技术文件。

项目技术状态基线是项目研制过程中在某一特定时刻被正式确认，并作为后续研制和生产活动基准的技术状态文件。它包括功能基线、研制（分配）基线和生产（产品）基线。这三种技术状态基线与项目发展里程碑的关系，如图 9.3 所示。

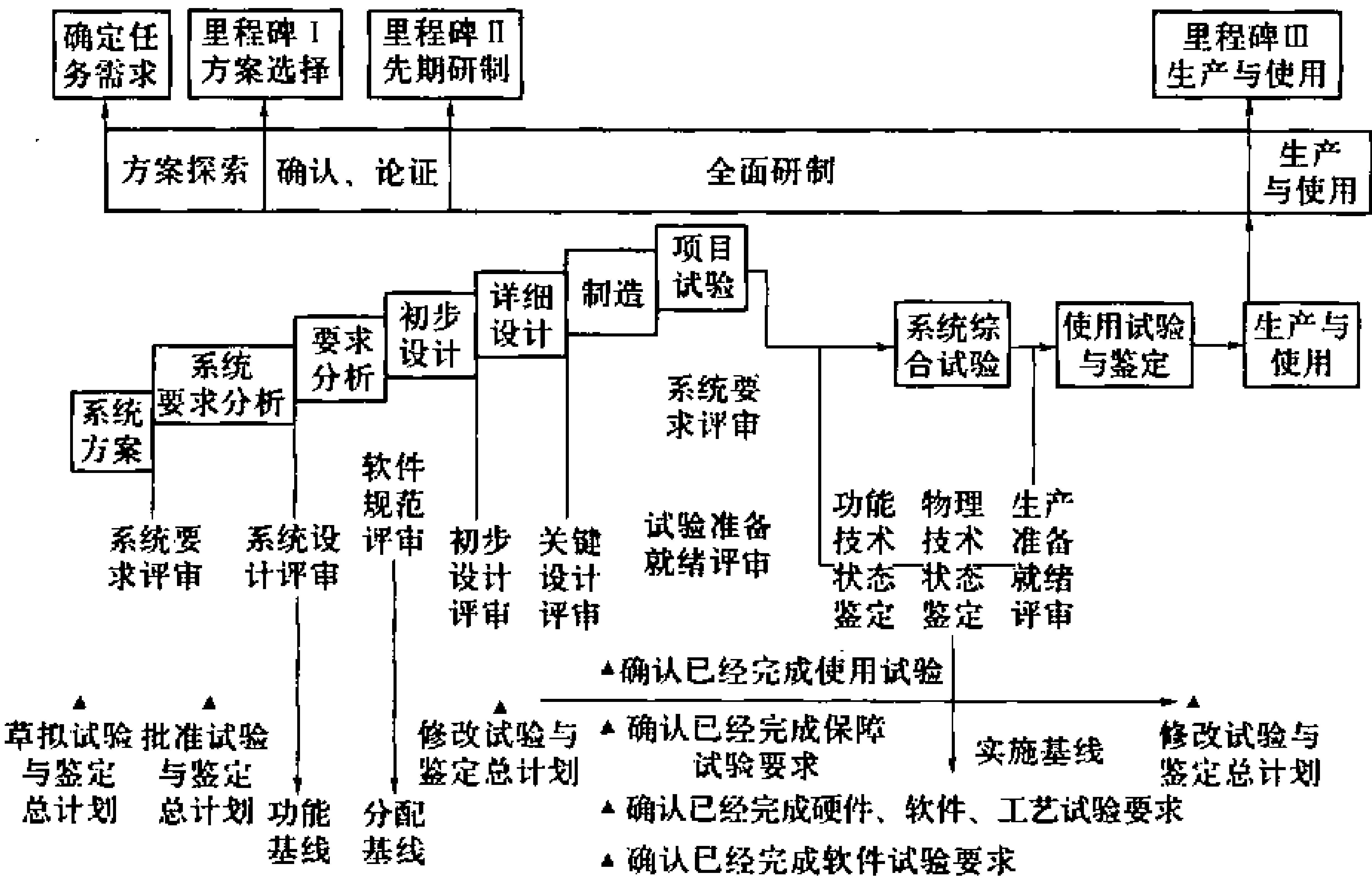


图 9.3　项目发展里程碑

项目技术状态管理的第一步，首先从项目的工作分解结构开始，将整个项目分解成便于管理的各部分技术，分解成子项目，再细分成更小的工作单元，直至分解成具体的工作包。并对每一项工作予以编码后输入文件。

“神舟”飞船研制技术状态管理的技术创新。在航天器研制中首次制定全系统功能基线体系，建立测试、复核、跟踪和保证状态变化的有效控制。对多达 100 余项技术状态更改，项目均按严格标准进行管理和控制。

神舟飞船技术状态管理的主要工作见表 9.2。表中，空格代表未实施；“√”代表实施（部分/全部实施）。

表 9.2 “神舟”飞船技术状态管理的主要工作

技术状态管理内容		方案阶段	初样阶段	无人飞行阶段	载人飞行阶段
技术状态标识	选择技术状态项目	√	√	√	√
	确定每个技术状态各阶段需要的文件			√	√
	确定技术状态基线	√	√	功能基线(完善项目);研制基线(完善、新增项目);产品基线(无更改的成熟产品)	
	监督、指导技术状态文件管理活动	√		√	√
	对更改、偏离、超差项目进行标识			√	√
技术状态控制	控制技术状态项目及文件的更改	√	√	√	√
	制定更改、偏离、超差控制程序和方法			√	√
	确保已批准的更改得到实施			√	√
技术状态审核	功能技术状态审核	√	√	√	√
	物理技术状态审核		√	√	√
技术状态纪实	记录并报告技术状态已批准的文件目录				√
	记录并报告技术状态更改的提出和审批情况	√	√	√	√
	技术状态的审核结果			√	√
	技术状态项目关键的超差和偏离情况			√	√
	已批准更改项目的实施情况	√	√	√	√
软件技术状态管理	纳入技术状态管理计划			√	√
	明确技术状态项目	√	√	√	√
	规定软件的文档和标识	√	√	√	√
	确定技术状态基线	√		√	√
	软件配置管理			√	√

2. “神舟”飞船进度管理(也称项目时间管理)

“神舟”飞船进度管理是确保“神舟”飞船研制准时完成所需的一系列管理过程与活动。包括界定和确认“神舟”飞船研制活动的具体内容,活动排序、估算工期、进度的管理和控制。界定活动的主要依据就是工作分解结构、约束条件和专家意见。

“神舟”飞船进度管理的难点是:工程紧迫、任务量大、研制并行进行而且战线长和协调面广,涉及管理水平不一的300多个跨系统、跨行业的承制和协作单位。“神舟”一号到五号飞船的研制进程如图9.4所示。

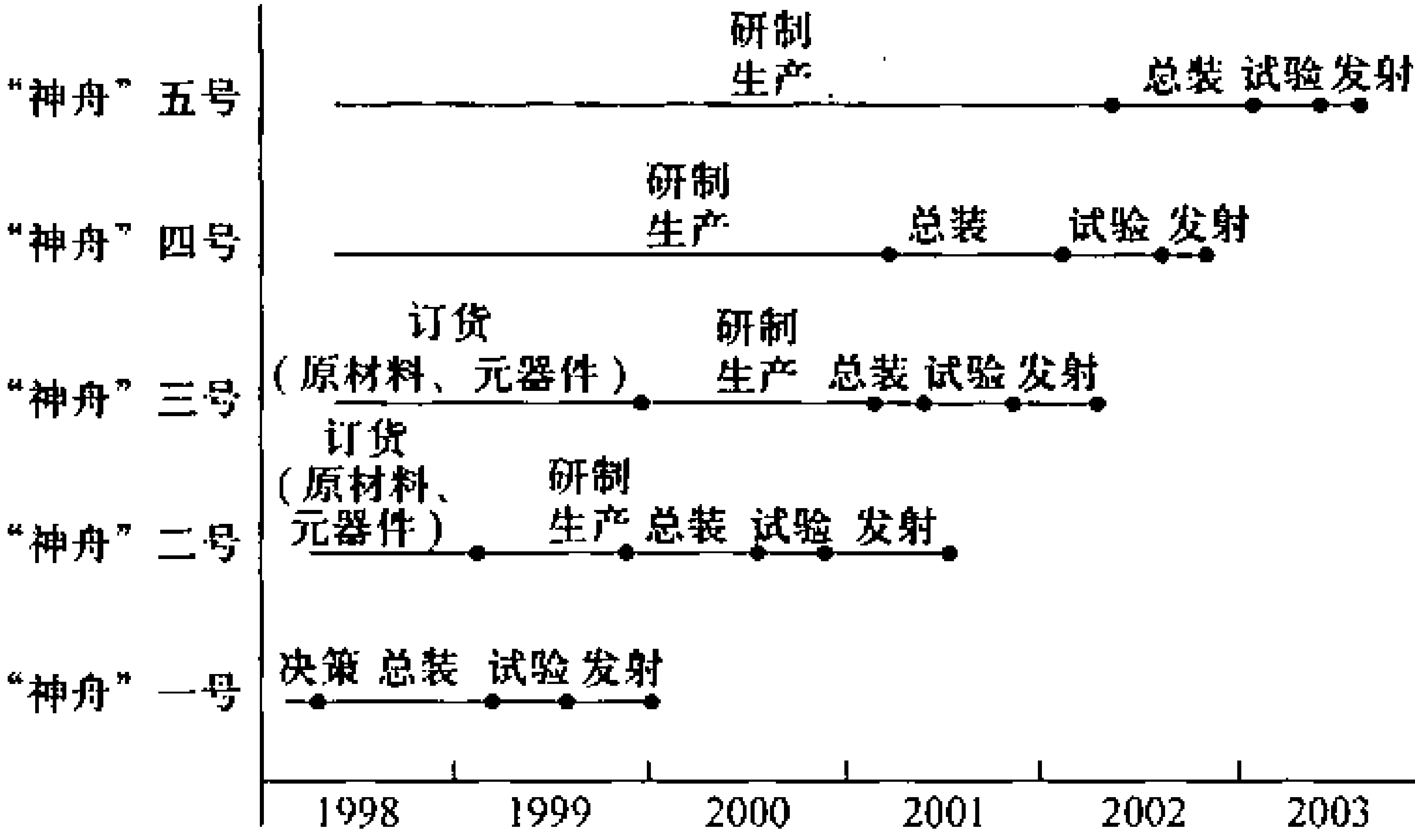


图9.4 “神舟”飞船的研制进程

并在研制进度管理中,创造和采用了多种管理方法与工具,保证了整个系统的顺利完成,见表9.3。

表9.3 “神舟”飞船研制进度管理的方法与工具

序号	方法与工具名称	主要作用	应用范围
1	两总联席会	顶层进度要求、确定进度里程碑和主要进度管理策略	会议形成的计划纲要是进度管理的依据,确定系统、整船和年度计划编制
2	综合调度会	进度、技术和质量的定期综合评估、明确下一阶段计划安排	进度计划控制
3	专题进度调度会	专题项目的组织、计划安排	专题项目进度计划制定和控制进度计划控制
4	班前会	布置每天工作、检查保障条件	进度计划控制
5	班后会	检查当日工作完成情况,明确第二天工作计划	进度计划控制
6	调度工作分解	利用工作分解结构,细分调度最小单位,主要是各接口、检查点	进度管理的活动定义、制定计划流程基础
7	计划模板	利用前一艘、前阶段或前次进度计划及实施结果形成计划基线进行现计划编制	进度管理的活动定义、各种计划流程的编制
8	网络图	综合采用箭线图法,包括主线、辅线计划和条件保障点形成网络	进度计划各项工作的排序及其关系
9	甘特图	描述计划各调度工作间的关系以及资源配置进行进度项目的历时估计	进度计划各项工作的排序及其关系

（续）

序号	方法与工具名称	主要作用	应用范围
10	专家评定	进行进度项目的历时估计	进度计划时间的估算
11	类比估算	进行进度项目的历时估计	进度计划时间的估算
12	历史数据	进行进度项目的历时对比	进度计划时间的估算
13	预留时间	进度风险预留时间	进度计划时间的估算
14	关键线路法	采用数学分析方法	制定计划流程
15	决速跟进法	采用历时压缩的方法,平行安排顺序工作	制定计划流程
16	资源平衡试探法	实现经费、物资和人力资源与进度平衡	制定计划流程
17	项目管理软件	时间进度动态管理	制定计划流程和控制
18	考核节点管理	进度与经费挂钩	进度计划控制
19	动态综合评估	进度完成情况综合分析	进度计划控制
20	偏差分析	进度完成情况综合分析	进度计划控制和调整
21	进度管理标准化	进度管理工作规范化	进度管理全过程

9.4 阿拉斯加原油运输问题

背景如下:美国的阿拉斯加的北部的普拉德霍湾(Prudhoe Bay)油田向美国本土运输原油,要求每天运输200万桶,油田处于北极圈内,海湾长期处于冰冻状态,陆地更是长年冰冻,最低温度达到-50℃,如图9.5所示。

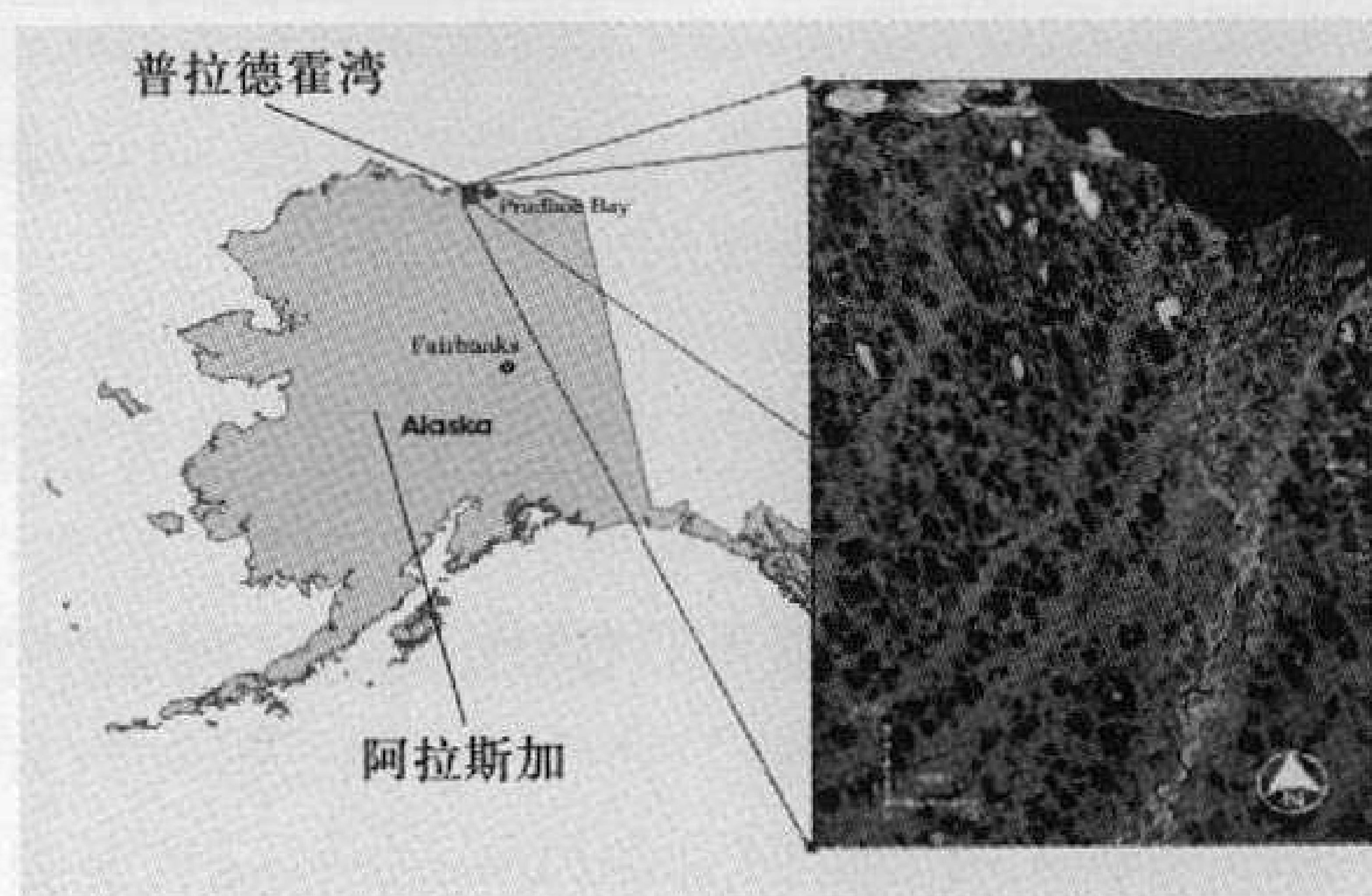


图9.5　阿拉斯加的北部的普拉德霍湾

决策人员拨出经费,请系统工程人员提出竞争方案。第一阶段,提出两种方案:

方案1:从海路用海船运输;

方案 2:在地面用带有加温系统的输油管道运输。

开始竞标:

方案 1 的优点:每天仅需 4 艘 ~5 艘超级油轮就可以满足运送量的要求,比铺设输油管道省钱。

方案 1 的缺点:

(1) 需要破冰船引航,既不安全又增加费用;

(2) 起点和终点需要建立大型油库,又是一笔巨额经费;

(3) 可能受到海风影响,产地油库的储量应在日产量的 10 倍以上。

方案 2 的优点:可以利用成熟的管道输油技术。

方案 2 的缺点:

(1) 沿途需建设加油站,管理复杂,还要供给燃料,安排运输又是一件困难的事情。

(2) 输油管道不能简单的铺在冰土里,因为冰土层受热熔化会引起管道变形,为避免输油管道断裂的危险,约 1/2 的管道(靠近油田)需要安装底架支撑,这样成本费比铺地下管道高出 3 倍。

归纳起来,方案 1 不安全、费用大、无保证;方案 2 比较安全可行,而且供油稳定,但还有许多问题有待解决,要再深入细致地研究。

决策者的策略:以方案 2 为决策方案,拨出经费,请系统工程人员提出竞争方案。

第二阶段,又有人提出第三方案。

方案 3:把 10% ~20% 氯化钠的盐水加到原油中去,使其在低温下成乳状液,用普通管道运输。

方案 3 的优点:可以省去加热的步骤,不仅节省费用,而且操作简单。其原理就是制作汽车的防冰液,这是很有创造性的方案。

决策者已拟定采用方案 3,但仍然要拨出经费,看看有没有更为理想的方案。

第三阶段,果真又有人提出了方案 4。系统工程人员研究认为,埋在地下的石油原来是油气合一的,这时它们的熔点是很低的。经过漫长的年代以后,油气才逐渐分离,系统工程人员提出将天然气换为甲醇以后再加到原油中去,以降低原油的熔点,增加了流动性,就可以用普通的输油管道同时输送原油与天然气了。

方案 4 不仅省去了运送无用的附加混合剂(海水),而且不必另外架设天然气管道,仅铺设管道就节省了 60 亿美元,比方案 3 节省了 1/2,如图 9.6 所示。

体会:这个问题可以看出是构建一个输油系统,目标尽可能安全可靠,尽可能节省费用。在这一过程中,最重要的是创造性思维。如果不是创造性思维,仅仅从设定的环境下对方案进行优化,是无论如何也优化不出方案 4 来的。

例如:方案 1 的改进方案,可以是建造更大的油轮,只在产地建设大型油库,建

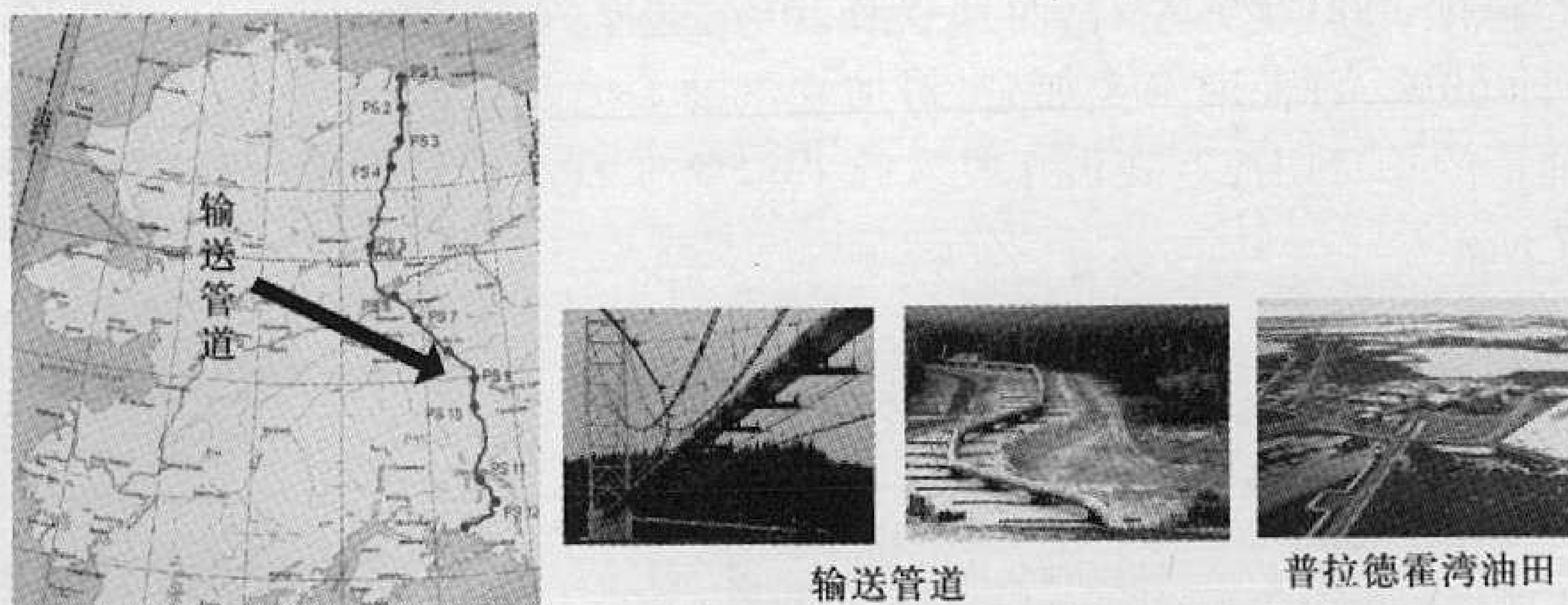


图 9.6　输送管道

造能抗击风浪的油船和破冰船等。

例如：方案 2 的改进方案，可以是输油管道上留有可作燃料用油的出口，改进管道的制造材料等。

例如：方案 3 的改进方案，可以是综合利用运到内地的氯化钠原料等。

9.5　汽车行业应对石油危机问题

20 世纪 70 年代初，世界范围内的石油危机爆发以后，西方各国石油供应短缺，油价上涨，汽车用户的交通负担显着加重，进而造成汽车销售量锐减，整个西方世界的汽车工业面临产业危机。

当时每辆汽车 5000 美元，对于年收入 10000 美元的大多数国民来说，如果按 5 年购买一辆新车计算，则每年所需的车费占年收入的比例为 10%，石油涨价前，汽车售价每加仑 0.2 美元，如果按每天车辆行驶 100km 计算，日耗油为 3 加仑，全年耗油费用 220 美元，占年收入的 2.2%，年均购车费与年均耗油量的总费用占年收入的 12.2%，石油涨价后，由于石油平均上涨了 4 倍，年均耗油量费用占年收入的 10%，年均购车费与年均耗油量的总费用占年收入的 20%，这样就使许多用户不得不停驶汽车，改乘公共汽车，从而出现汽车市场的危机。

如何应对这一危机，或者减少生产，解聘工人，但这是汽车产业所不愿意看到的，或者改革汽车设计，生产出廉价省油的轻型汽车。

日本的系统工程人员提出了“不变负担准则”，即保持汽车用户的年均交通费维持石油涨价前的水平不变。

考虑当时汽车工业采用的技术情况以后，可以推断出，节油的具体措施是：采用计算机控制发动机工作可节油 10%，使用酒精汽油混合燃料可节油 10%，除此之外，再设计与制造工艺方面降低汽车造价，用廉价的工程塑料取代钢铁用来制造汽车，不仅减轻车体自重 20%，大大降低了汽车的造价，使汽车的售价有

可能控制在3000美元左右，而且节油20%，这样一来，如果按照购车费3000美元，节油60%，日耗油1.8加仑，每加仑汽油1美元计算，可使年均购车费与年均耗油量的总费用控制在占年收入的12.5%左右。日本蓝鸟车的发展变化，如图9.7所示。

图9.7　日本蓝鸟车的发展变化

当初计算的结果与后来的市场情况基本吻合。

下面，就用一个被称作“目标树”的图，来描述上述目标分解的过程，也是系统开发的逻辑框图。在系统开发活动的初期，目标的含义常常是一些广泛的和含糊的口号式的要求，如“积极应对石油危机，三年内生产出省油的轻型汽车”，这种口号式的总目标，多半是定性的措施，尽管不具体，但对于系统开发来说，具有指向作用。

这种指向作用是通过下述程序来实现的：

（1）将总目标层层分解，分解成若干级的子目标，建立目标集；

（2）搜索与目标集对应的结构；

（3）确定目标系统的输入集、输出集和目标系统的状态集；

（4）构造系统，即联结与目标集对应的结构；

（5）验证构造系统的效能。

在上述程序中，将总目标分解成若干的子目标是首要的任务，将一个含义广泛而含糊的总目标开发为一个有一定结构形态的目标集，进行这一工作时，一般的方法是通过使用一些“介词”来实现它们的联系，如

“与……相似”，

“与……相等”，

“对……有用”，

“以……为前提”，

“在……条件下”，等等。

通过使用这些“介词”，我们可以从上一级目标，搜索相应的下一级子目标，从而将各级目标展开成树状结构，如图9.8所示。

开发系统的第二个重要环节是建立系统的价值，只有确定了价值目标才能恰

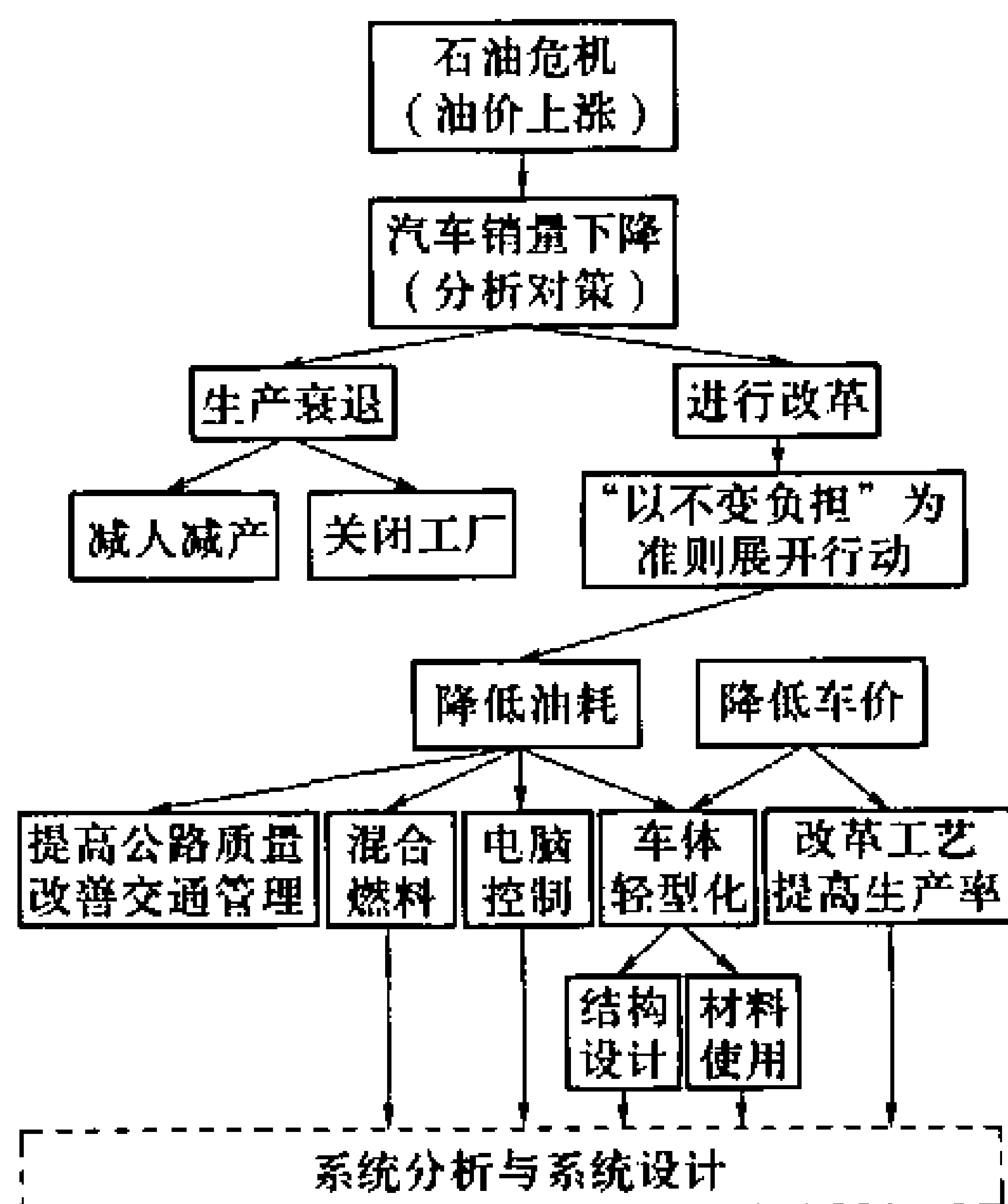


图 9.8　日本汽车工业应对石油危机的目标树图

当地处理系统和外界的结构关系，本例题中所确定的"不变负担的准则"是解决本问题的关键。

9.6 "鱼钩"与"长矛"

"鱼钩"与"长矛"理论是中国国际关系学院、民革中央法律委员会委员、耶鲁大学教授高志凯先生提出的，是关于奥运安保的对策建议。此文章被称为是 30 年来，体制外力量的建议受到的最高级别的重视。此后，"鱼钩"与"长矛"理论，被迅速运用于实践，为奥运安保工作的顺利展开奠定了基础[5]。

高志凯并不是安保方面的专家，也不是军事专家，为什么他提出这一理论能够受到国家领导人的高度重视？

我们认为，他充分运用了系统思想，站在大系统和全局的高度，从宏观层次系统分析了奥运安保问题，将奥运会可能遇到的情况划分为两类："鱼钩"与"长矛"，并提出了相应的处理方式。可以看出他所提供的对策不仅客观全面，而且简单明了，易于执行。因此这一理论能够受到如此高度的关注。下面简述其系统分析过程。

1. 明确问题

在奥运会历史上，各种各样的事件层出不穷，例如在 1972 年德国慕尼黑奥运会举行期间，巴勒斯坦恐怖组织"黑九月突击队"袭击以色列运动员驻地，枪杀 2 名运动员和 9 名其他人质。1996 年美国亚特兰大奥运会期间，奥林匹克公园发生

爆炸,造成1人死亡、100多人受伤。因此北京奥运会期间,全球各派势力肯定会聚众闹事,这本身不足为奇。

2. 确定目标

奥运会的总目标是"绿色奥运、科技奥运、人文奥运"。在这一总目标的要求下,奥运安保的目标应该是为北京奥运会的成功举办提供高水平的安全保卫工作。

3. 预测未来环境

奥运会可能遇到的事件有亮旗、打标语、喊口号、上街集会游行、爆炸、劫机、劫持人质、杀人放火、下毒等活动。

4. 分析后果

亮旗、打标语、喊口号、上街集会游行等这类"言论型"的事件属于危害不严重的事件,不会影响目标的实现,这些事件类似于"鱼钩",其本身并不可怕,可怕的是自己上钩。北京奥运会期间,肯定会有人布下"鱼钩",他们的目的就是为了让我们上钩,只有我们上钩,反应强烈过度,则正中布下鱼钩者的下怀,如果我们不上钩,他们就不会得逞。

爆炸、劫机、劫持人质、杀人放火、下毒等事件影响极坏,可能导致系统目标不能实现,这类事件类似于"长矛",这些破坏活动和破坏分子不仅我们深恶痛绝,国际社会也会深恶痛绝。在打击这类破坏分子方面,我们和国际社会是一致的。

我国有可能犯的错误是,用对付"长矛"的手段来对付"鱼钩",或者错把"鱼钩"当作"长矛"。这很容易引起国际社会的强烈反应,对我国不利,有可能影响总目标的完成。

5. 确定方案

1)"鱼钩"类事件

对于"鱼钩"类事件要软处理,要宽容对待,不能过激反应,更不能用高压手段予以打击。因为绝大部分来我国闹事的人,都属于"鱼钩"类的闹事者,而且他们的很多"言论型"的言论和行为,在西方往往都属于法律保护范围之内,不必大惊小怪。我们应该藐视"鱼钩",甚至可以对"鱼钩"适当地听之任之,这样一来,反而容易得到国际社会的赞赏。

2)"长矛"类事件

对于"长矛"一定要果断出击,严惩不贷,毫不手软,但是应该及时让国际社会了解真相,避免误解。

在执法过程中,最主要的挑战是如何做到适度反应,避免过度反应。对于不同的事件,如何适当掌握分寸,区别对待,适度处理,这是关键。对于"鱼钩"和言论,应该大题小做、大事化小、小事化无。对于"长矛"和行动,应该大题大做,适度反应,适度处理,但是应该避免小题大做。例如,他们可能在现场一方首先发难,故意挑起我们的过激反应,引诱我们上钩,然后再波浪式地接二连三地发动持续性的、

此起彼伏的抗议活动,对我们的过激反应进行发难,使事件不断恶化升级,而西方媒体很有可能早有部署,发难时会予以全力配合。因此,我国的反应适度十分重要,切忌把首发事件当作事件的整体,切忌上当中招,切忌上钩受骗。

高志凯先生这一理论给中国5000年来一直秉承的传统保守执政观念提供了一个很好很有效的简单易懂的思路,政府作为执政者职能就是决策后给下属机构下指示,但是指示中的"保证"、"务必"、"确保"、"不容许"等字眼往往会给下层执行领导者施加很大压力,但是具体应以怎样的方式才能达到政府所期望的目标时,这些机构一般都是采取传统的中国式处理方式"一刀切"。这种方法用了几千年,的确行之有效,药到病除。但是往往忽略了"药"的副作用。现在中国要溶入国际社会,想要塑造一个好的国际舆论环境,下药时就要十分谨慎了。高志凯先生对奥运安保的系统分析提供了解决这类问题的方向和思路。

9.7 长沙市城市交通问题

湖南省省会长沙,20世纪80年代初,市区人口77万,从南向北流淌的湘江贯穿长沙,长沙城区集中在湘江以东,京广铁路以西的狭小区域,从京广铁路长沙火车站向西,通过长沙城区的东西主干街道——五一路,跨过架在湘江上的"湘江大桥"连接到湘江以西的岳麓山风景区。

湖南省委、省政府、长沙市委市政府、国防科技大学,著名的公园,体育馆,主要商场宾馆等大多数集中在五一路两侧附近。岳麓山风景区周围主要是高校区,如湖南大学、中南工业大学、湖南师范大学、湖南财经学院、省委党校等。

城区的这种布局本来就造成了湘江东西两岸之间交通不便,南北方向交通不畅。不仅如此,在湘江南北两个方向很长的河段内只有一座"湘江大桥"连接五一路东西两侧。这样一来,这座"湘江大桥"不仅是长沙东西两城区的连接纽带,而且是在很大的地域内跨越湘江的咽喉。另外,湘江以东、京广铁路以西还存在着一条旧铁路,断断续续地运营着,使得长沙城区不仅缺少一条贯穿南北的主要街道,而且对东西方向的交通也造成了极大的障碍。再加上,城区内站点设置不合理,路况不好,公交车辆既少又破,运行速度慢、等车时间长,市民们反映强烈。

1982年春天,长沙市政府由市秘书长牵头,在省有关部门的领导下,下决心对城市交通系统进行改造,首先将决策优化论证任务交给由张启人、汤国熙等组成的系统工程小组完成。当时作者作为系统工程小组的成员,担任课题研究的技术顾问,是如何工作的呢?

首先对当时的长沙市公交系统进行"诊断"。主要做法是:

(1)调研最新版的湖南交通图,长沙市交通图。

(2)持特别乘车证,利用两个月的时间,对长沙市所有线路上的公交车,从早

晨首班车到晚间末班车全部来回登乘，逐次逐时逐站记录上下乘客的人数，站点等车人数，各站点之间运行的时间。然后将这些情况汇总绘制在一张“城市公交全图”上，从而可在城市公交全图上显示出任何两站点的通行人数。

(3) 对每一线路上的公交车站进行蹲点统计，统计各次车到来的间隔，乘客候车时间，客流高峰时段和客流低谷时段，将这些数据汇总绘制在“城市公交全图”上。

(4) 对较大的居民小区，较大的工矿企业、院校、政府机构、商场医院等进行“出发地—目的地”的调查，将情况汇总绘制在“城市公交全图”上。

然后，分析总结出当时长沙公交的突出问题，这些突出问题主要是：

(1) 等车时间长，转车次数多，车况、路况差。

(2) 南北方向交通困难，没有贯穿南北的街道。

(3) 东西方向交通拥堵，特别是五一路上车辆不如步行快。

(4) “文革”期间建造的“湘江大桥”负载太重，已经不堪重负。

如何解决这些问题呢？依据1981年10月由湖南测绘局编绘印刷的长沙交通图，如图9.9所示，简略图如图9.10所示，系统工程小组提出了“梯次解决”的决策思路。

具体地说，决策思路分为三步走，由近期、中期、远期等三个方案组成。

方案1：近期，重点解决等车时间长，换车次数多的突出问题。

(1) 尽快购置一批档次较高的大轿车投入公交运营，缩短班次间隔。

(2) 延长各线路车的并行长度，调整站点，尽可能使两条不同线路的公交车有多个公共的停靠站，减少换车次数。

(3) 对个别路段，扩宽，加强管理，提高运行速度。

(4) 对人口密集居住地与目的地增开专线车。

近期方案，3年左右时间可以实现。

当然，围绕近期方案，有许多下一个层次的优化工作要做，例如：每条线路如何调整站点？购置何种车型的效费比高？购买多少台车辆比较合适？等等。

方案2：中期，重点解决南北交通困难的问题。

长沙市主城区一直没有贯穿南北的主街道，几乎所有的南北行驶的车辆都需要先到东西方向的五一路，然后沿着五一路行驶一段路程，再拐到南北方向的街道上去，不仅增加了行驶路程，而且加大了东西方向的五一路的压力。

拆除南北方向的旧铁路，在此基础上扩建成一条南北主干街道，建议在10年左右完成。

当然，围绕中期方案，也有许多下一个层次的优化工作要做，例如：南北主干道，修成几个车道，是否留有进一步扩展的余地，是否建大型立交桥，地下铁路，等等。

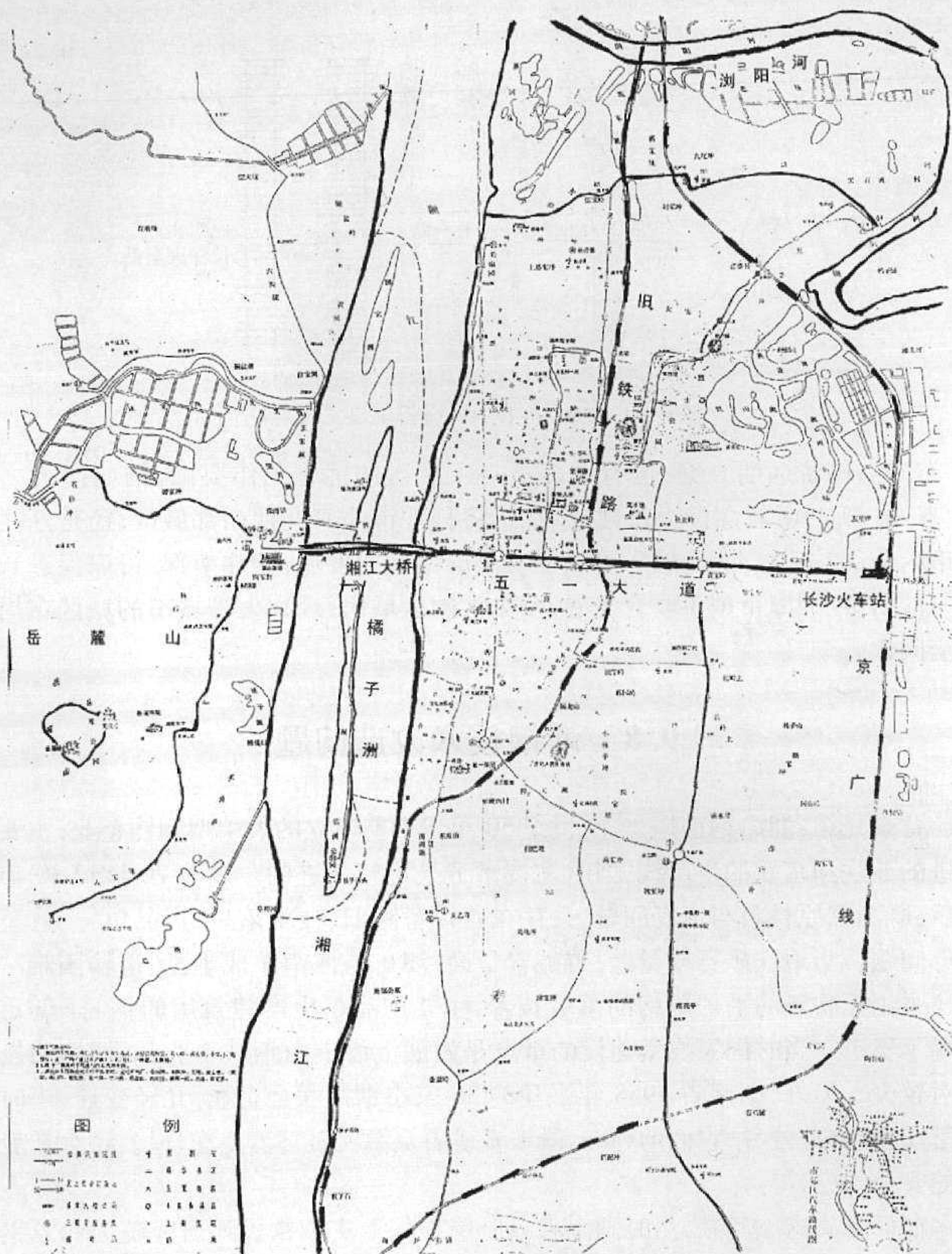


图 9.9　1981 年长沙交通图

方案 3：远期，重点解决长沙城市交通的咽喉问题。

具体地说，在湘江的上游、下游各建一座跨江大桥，以这两座大桥为基础，修建长沙市的外环路，将目前的长沙市东西城区以及岳麓山地区全部包括在内，形成长沙市的大城区，这一方案建议在 20 年内实现。

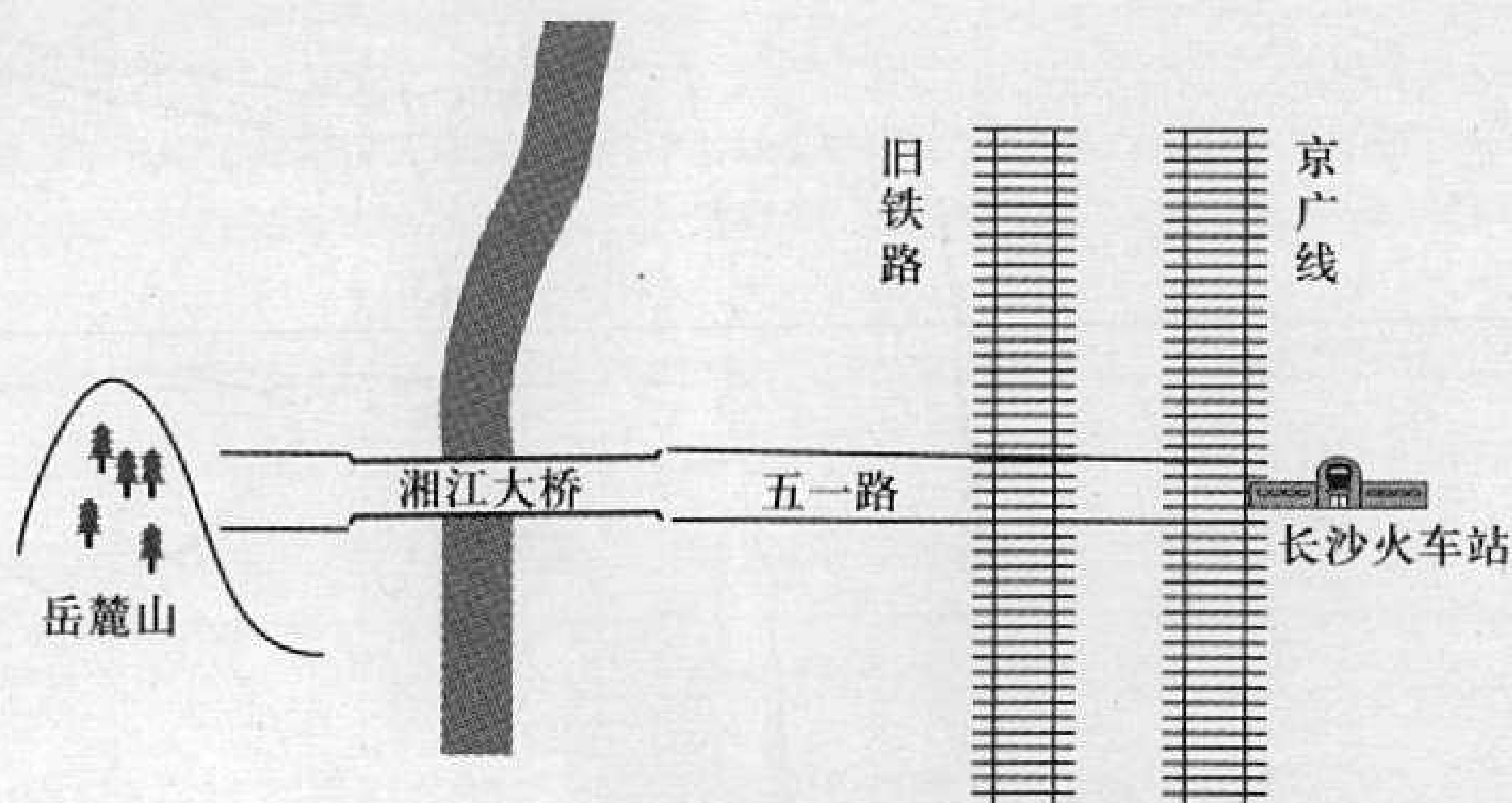


图 9.10　1981 年长沙交通图主要交通要道

当然,围绕远期方案,也有许多下一个层次的优化工作要做,例如:“五一大道”拓宽、新的南北湘江大桥建成以后,将长沙市政府迁往西部城区,还是迁往长沙市的南部?迁往西部城区,可以带动西部城区的发展;迁往南部,可以促进长沙市与株州市、湘潭市携手联合发展,在更大的区域内,规划大型城市的城区布局与公交问题。

9.8　湘钢技术改造问题

背景介绍:湘潭钢铁厂是 20 世纪 50 年代末期建立的大中型钢铁企业,主要是引进的苏联和东欧的生产线,当时在技术上是比较先进的。进入 20 世纪 80 年代以后,既面临原材料与市场问题,又存在着设备陈旧、技术落后、产品单一、效益下降等问题。当地铁矿石质量差、磷硫含量高,澳矿与海南矿成本高、运输困难。当时还采用无吹氧的平炉炼钢的落后技术,主要产品是生产建筑用的钢筋(盘元),市场不稳定。当时国家投资建设的重点是发展上海宝山钢铁企业,对湘钢的投入相对较少。另外,湖南省 1958 年兴建的 36 家小钢铁联合企业,几经变迁,当时只剩下 6 家,自负盈亏,它们的存在,既浪费矿石资源又破坏着生态环境,还存在着严重的安全隐患,等等。

如何解决这一问题,当时湖南省政府曾委托重庆钢铁设计研究院为湘潭钢铁厂做出投资 7500 万元的技术改造方案,省政府一时还筹集不出这么多钱来,对当时的 6 家小钢铁厂更是无暇顾及,采取断奶与“自生自灭”的政策,各方面的矛盾比较突出。

1983 年 6 月 19 日,湖南省人民政府以省计委的名义下达(1983)47 号文件,要对钢铁企业的技术改革方案进行系统分析,并将这一任务交给湖南省系统工程学会,由湖南省系统工程学会组建“系统工程小组”承担湘钢技术改造综合论证工

作，论证总体组由汪浩、杜玠、陶纳、陈庆华等组成。

系统工程小组首先深入湘潭钢铁厂进行“系统诊断”，通过调研认为，该企业在炼铁、炼钢、轧钢等三个主要环节上都存在一些亟待解决的问题。

炼铁，高炉需要大修改进，由于本地矿石的品质不好，从海南、澳大利亚购进外矿作为配料，又存在着最优联运和矿石的合理配料等问题。

炼钢，当时“无吹氧平炉炼钢”技术，被国内本行业认为技术落后需限期废除，无吹氧的平炉要改造成吹氧转炉，还有制氧站选址，修建及环保问题。

轧钢，目前只有一条生产线，希望再上一条新型专线；目前采用的是从炼钢分厂运来的冷却钢锭再加热熔化后进行轧钢，希望“炼钢—轧钢”一条龙的“联铸”。

厂区的总图运输问题需要配套解决，目前是当年苏联设计的“F”型布局。

系统小组研究认为：

(1) 该企业的投资额与年增效益值之间的关系呈阶梯形，投资5000万元是一个峰点，投资1亿元是下一个峰点，如图9.11所示。

(2) 当前就生产能力而言，炼钢处于哑铃的细脖子处。

(3) 从技术角度来讲，炼钢环节的技术改造是硬性要求，而且技术成熟。

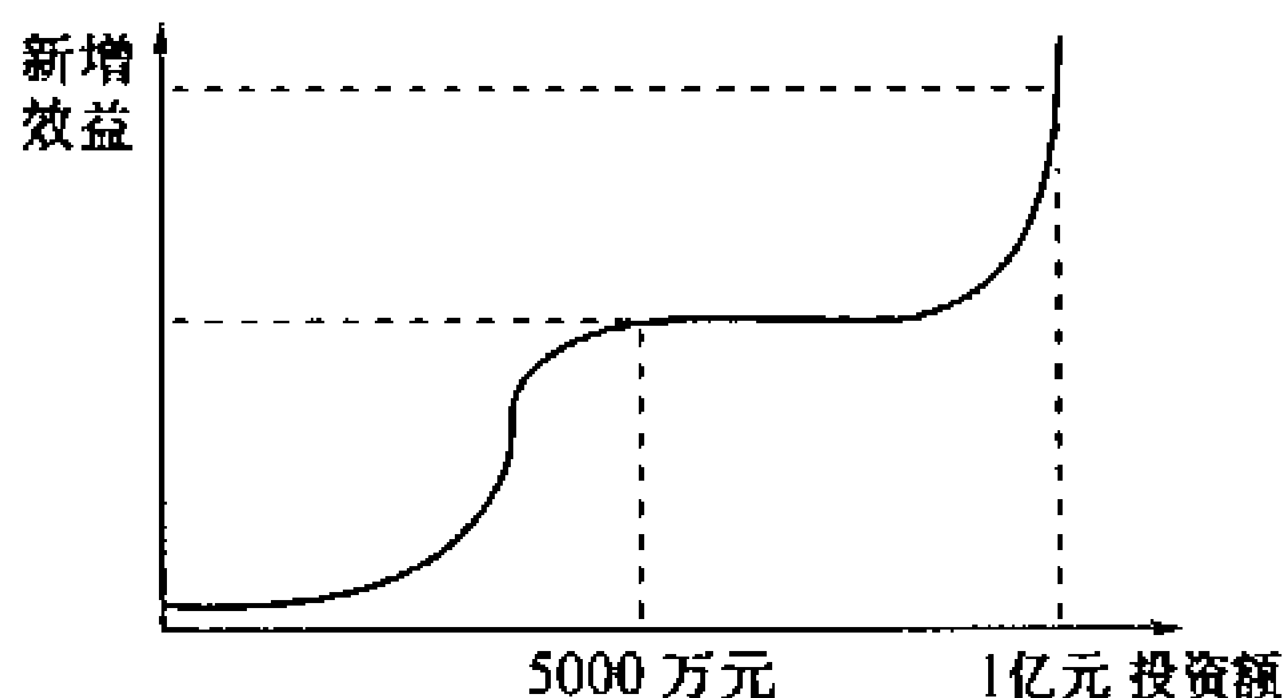


图9.11 企业的投资额与年增效益值之间的关系

由于投资方不可能一次性投资1亿元的资金，系统工程小组提出“中间开发式”概念，首先对炼钢系统进行整体改造，无吹氧平炉改造为吹氧转炉，总投资可控制在5000万元左右，并对改造后的效益进行了预测，经过3年～5年，将新增效益再用于炼钢、轧钢系统的进一步改进，并对以后炼钢、轧钢系统的改造提出了意向。

1983年9月，湖南省政府召开办公会，集体听取了系统工程小组的研究报告，省政府采纳了这一建议。《湖南日报》1984年1月11日报道说，系统工程小组提出了新的改革方案，可比原来减少投资2500万元。

《冶金报》1984年5月25日报道说，国家计委已经正式批准湘潭钢铁厂首先进行炼钢技术改造，计划1986年底完成技术改造。改造后初步计算炼钢工序一年可节约能源6万吨标准煤，其中可少烧重油2万吨，当钢产量达到设计能力时，全厂一年可增加利润1500万元。改造后的湘钢，如图9.12所示。

“中间开发式”的战略思想，不仅解决了当前限制企业良好运行的“瓶颈”，而且为企业下一步更大发展赢得了空间和资金。

系统工程小组提出了湘潭钢铁厂的分析报告以后，即开始针对省属6家“小钢联”进行系统分析。其背景是20世纪50年代，在当时大办钢铁的“大跃进”口

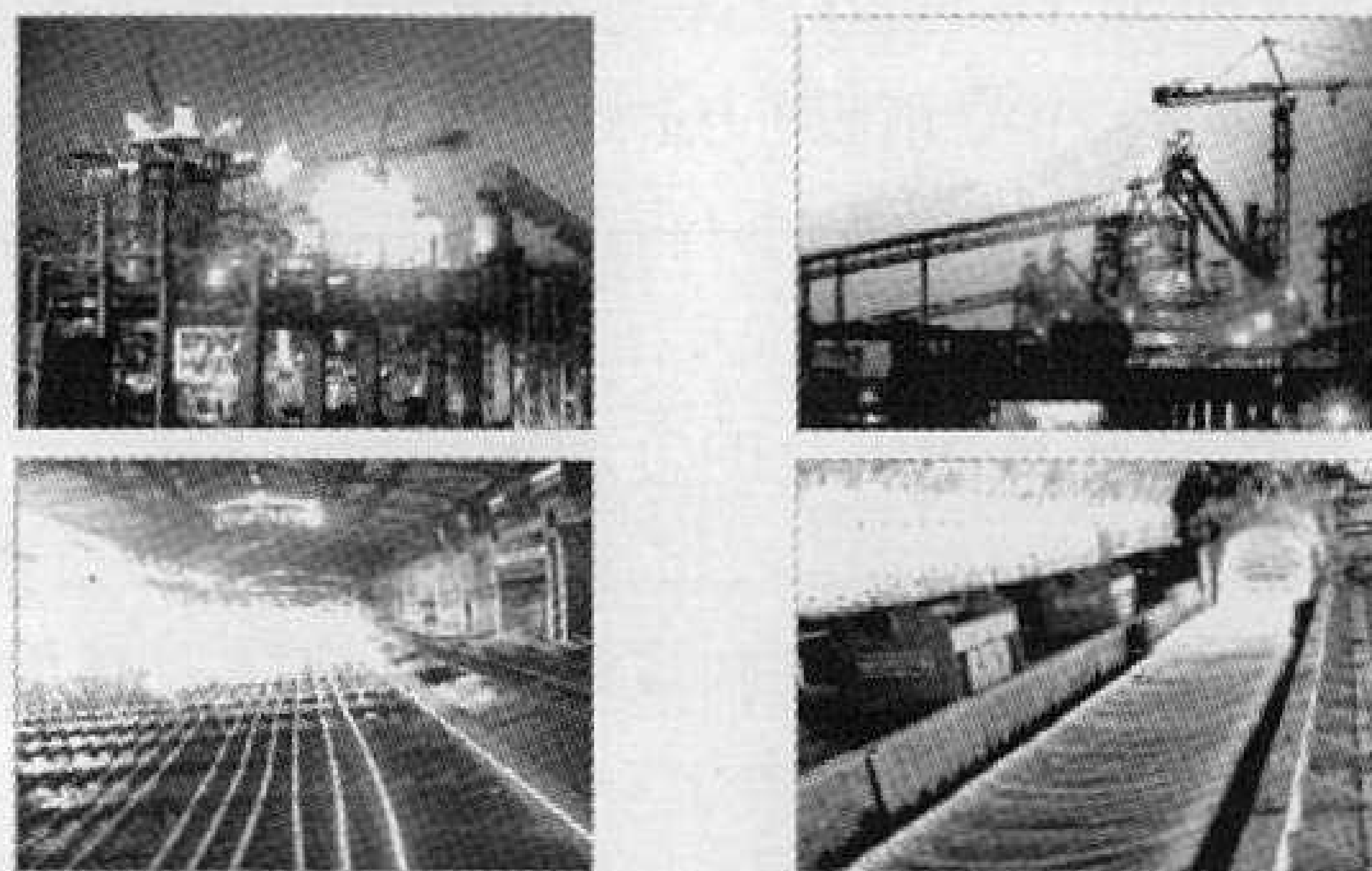


图 9.12　技术改进后的湘潭钢铁集团

号的鼓舞下，湖南省各地由于铁矿、煤矿矿层浅，开发便利，建立了许多小钢铁联合企业，后来由于各种原因，大多数停办了。进入 20 世纪 80 年代以后，仍有 36 家被保留下来，其中有的也不再是单纯的钢铁企业，兼以生产化肥、农药等产品。由于这里“小钢联”普遍存在着能耗高、技术落后、产品质量差、破坏资源、环境污染严重、生产不安全等问题，政府一直想一律关停，但是由于种种原因，一些“小钢联”继续存在，看起来还挺红火。后来政府对其采取“断奶”与“自生自灭”的政策。

1984 年春天，湖南省政府主管部门决定将关于“小钢联”的政策论证研究交给系统工程小组，成员有韩光、陶纳、陈庆华等人。

系统工程小组通过实地考察得知，36 家“小钢联”，实际上多数已经停产，最后剩下的不足 10 家还带着“小钢联”的帽子，实际上已经转产化肥、农机修理等，真正还称得上“小钢联”的很少。各个“小钢联”的情况也各不相同，攸县的酒埠江钢铁厂位于湘东地区一个山坳里，隔罗霄山与江西省相望，处于酒埠江水库的大坝下面。钢铁厂所用的铁矿石原料多是当地农民手工开挖的地表的“鸡窝子矿”，电力来源是位于酒埠江水库的水力发电站，湘东地区雨量丰沛，当时电力还没有联网，电力部门鼓励农民们用电。钢铁厂生产的产品都是当地农民生产生活急需的农家用具，如水车底架、烤火炉子等，这对于交通不便的湘西山坳来说很有销路。钢铁厂的工人就是不脱离农业生产的附近的农民，农忙时工厂放假，农闲时开工生产。上级政府采取“断奶”和“自身自灭”的政策，对他们不但基本不起作用，而且使他们错误地认为政府不再限制他们的发展，不再要求他们关停。

系统工程小组研究认为，这种被当地政府称为“五小企业”的“小钢联”，实际上从当时短期的小环境来说，确有存在的“合理性”，能提供适销对路的产品，电力资源丰富，能安排农村剩余劳动力，但从长期的大环境来说，又确实应该“关闭并轨”，问题的关键是必须制定一个具有操作性的政策。

系统工程小组向省政府提出，应放弃“断奶”与“自生自灭”的政策，代之以“加强管理、区别对待、个别扶持、综合治理”的政策。例如加快交通线路的建设，加快

电力联网建设,加强森林保护的措施,进一步落实农民承包山林山地的政策,激发农民封山造林的积极性,有效转移农村剩余劳动力,等等,对个别的企业要允许存在一定时间,待相关条件具备时再出台相关政策。

系统工程小组还建议,应加强"小钢联"的财务管理和监督,许多情况下企业的实际经营者就是当地乡镇农村的负责人。这样就为政府部门的决策提出了基础性材料。

但是,再好的政策必须依靠人去执行。2002 年 4 月 17 日,《中国青年报》第 7 版报道,"五个小煤矿掏空一山村",农田在脱水,山村在失水,庭院在开裂,稻田再也长不出庄稼,旅游胜地酒埠江正在失去她美丽的颜色。矿井是 1987 年开始慢慢发展壮大的,村民慢慢加入到矿工队伍,当他们发现矿井颠覆他们的生活时,他们已经无力保护自己了。矿主说,上级有关部门规定的三证和执照,他们都有,开矿合法、采煤有理。

9.9 百年一遇的洪水冲垮了"垸子"

1983 年的夏天,本书作者在一位老专家的带领下,到湖南省洞庭湖畔的汉寿县城出差,参与该县的经济社会发展规划论证研究。以前对什么是"垸子"不清楚,到达洞庭湖畔才知道,原来就是围湖造田所形成的"家园"。在洞庭湖区,有很多连绵不断、断断续续的小湖泊,多数是"湘资沅澧"的近湖段所形成的,水不深,说它是"沼泽地"、"芦苇荡"、"湿地"更合适,据说是长江的泻洪区。大概是"文革"前后,兴起了"围湖造田"的高潮,人们选择一块沼泽地,周围打起堰坝,围起来,把里面的湖水抽干,就可以建立居民点了,建造住房,开垦稻田,这就形成了星罗棋布的"垸子"。这样的"垸子"越来越多,一望无际的洞庭湖区被无数个"垸子"围追堵截,逐渐萎缩成沅江狭窄的下游河道。随着河道底部淤泥的增加,沅江下游成了悬河。每年的暴雨季节,国家都要拨出巨款,购置石料,加高堤坝,用高压水泵从低洼的"垸子"里向高处的沅江河道抽水排洪。不仅如此,由于形成了很多的"死水湾",造成了血吸虫防治的困难。年复一年,令地方政府很伤脑筋。课题组研究建议,"退耕还湖"、"退耕还芦"。但是,执行起来谈何容易。大大小小的"垸子"已经很有规模,退耕以后,这些"永久居民"住在哪里?依靠什么营生来养活他们。课题组的一位成员无奈地调侃说,看来,这个问题的真正解决,就只能依靠长江流域发生一场百年一遇的特大洪水了,冲跨所有的"垸子",借助大自然的力量,恢复洞庭湖的生态环境了。关于"退耕还湖"的建议只能是纸上的东西了。

1988 年 10 月,湖南省科学技术咨询中心召开会议,湖南省系统工程学界平时不常见面的老朋友又见面了,自然谈起当时大家关心的话题,诸如洞庭湖区围湖造田与长江三峡工程等。

大家认为，尽管有的专家提出为了增加重庆市通航的能力，建议提高大坝的高度，但是也有专家认为，蓄水高度不能太高，否则，不仅使重庆的水位上升，淹没江岸边的许多建筑物，而且可能增加库区周围的山体滑坡，还可能引起局部气候的变化。也有的同事说，大量的泥沙沉积在库区底部，而不是被江水携带到入海口沉淀，可能会使得入海口的造地速度变慢，是否有可能造成海岸线后退的现象，如同苏北地区的老黄河口那样。另外一位同事说，海岸线后退不可能，世界上四大河流，除长江以外，密西西比河、尼罗河、幼发拉底河，也都在北纬30°左右入海，入海口都形成了三角洲，历史上没有出现海岸线后退的现象，造地的速度可能变慢，但不会因为携带的泥沙少就海岸线后退。由于人类活动的加剧，水土流失严重，也只是最近50年的事情，以前人类历史经历了很长时间，也没有发生海岸线后退的事情，只要江河还从这里入海，就不会出现苏北的老黄河口的情况。但是，三峡库区的泥沙淤积问题必须引起高度注意。

关于三峡大坝的高度，不能太高，主要是对气候的影响。四川省周围是山，中间是盆地，历史上盆地与外界的交通主要是长江航运，长江同时又是东南方向的暖湿气流进入四川盆地的主要通道，来自东南方向的暖湿气流进入四川盆地以后，顺着山势上升，与来自西北方向的干冷气流相遇，形成降雨。如果大坝的高度隔绝了暖湿气流，就可能影响到云贵川地区的降雨量。当然，对于三峡工程来说，即使三峡工程建成完工，洞庭湖的泻湖调节作用也不能降低，洞庭湖的生态问题仍然很重要。

不仅长江三峡，对于云南的元江—洱海，以及贵州的红水河—北盘江也起到这种作用。这两条河流也是东南方向的暖湿气流进入云贵高原的通道。如果东南方向的暖湿气流在云贵高原受阻，除了造成云贵川的干旱以外，还有可能使得暖湿气流在云贵高原和黄土高原的夹缝中长途直入，穿过河西走廊到达阿尔泰山，沿着阿尔泰山的南麓上升，与来自西北方向的干冷气流相遇，在新疆北部出现强降水现象。同样的道理，怒江、雅鲁藏布江是来自印度洋的暖湿气流进入青藏高原的通道，如果因拦江大坝受阻，有可能使得青藏高原的降水量减少。

1998年夏，长江发生了百年一遇的洪水，洪水冲垮了洞庭湖区大大小小的"垸子"，怎么办？这年年底，正如《作家文摘》(2010年3月30日第1322期)报道的，当时的三峡工程审查委员会预审专家翁长博所说：1998年年底，湖广地区积极贯彻中央的新方针"平垸行洪、退田还湖、移民建镇"。"垸子"的出路就算有了定论。

9.10 预测"非典"疫情

当2003年全球性的"非典"疫情爆发时，预测疫情的发展引起了人们的高度关注，人们可能首先想到的是采用已有的预测方法，如系统动力学方法、灰色理论

法、概率统计法等"方法"，结果发现，由于历史数据、现实数据太少，都不能解决问题。本书作者当时也在关注这个问题。

其实这种季节性的流行性传染病的预测还是有"术"可寻的。虽然数据少得可怜，但换一种"术"，这些数据就足够了。这种"术"就是"类比曲线法"。一种季节性的大面积的传染病开始在某一个局部地区肆虐的时候，实际上总是经历一个开始发生、快速扩展、高峰平缓、缓慢下降的过程情况，这种变化情况可以作为这种传染病在另一地区扩散传播的"类比曲线"。

当"非典"在广州肆虐的时候，作者记录了每天新增病人数曲线，从 2002 年 12 月初到 2003 年 4 月中下旬，这条曲线如图 9.13 所示。

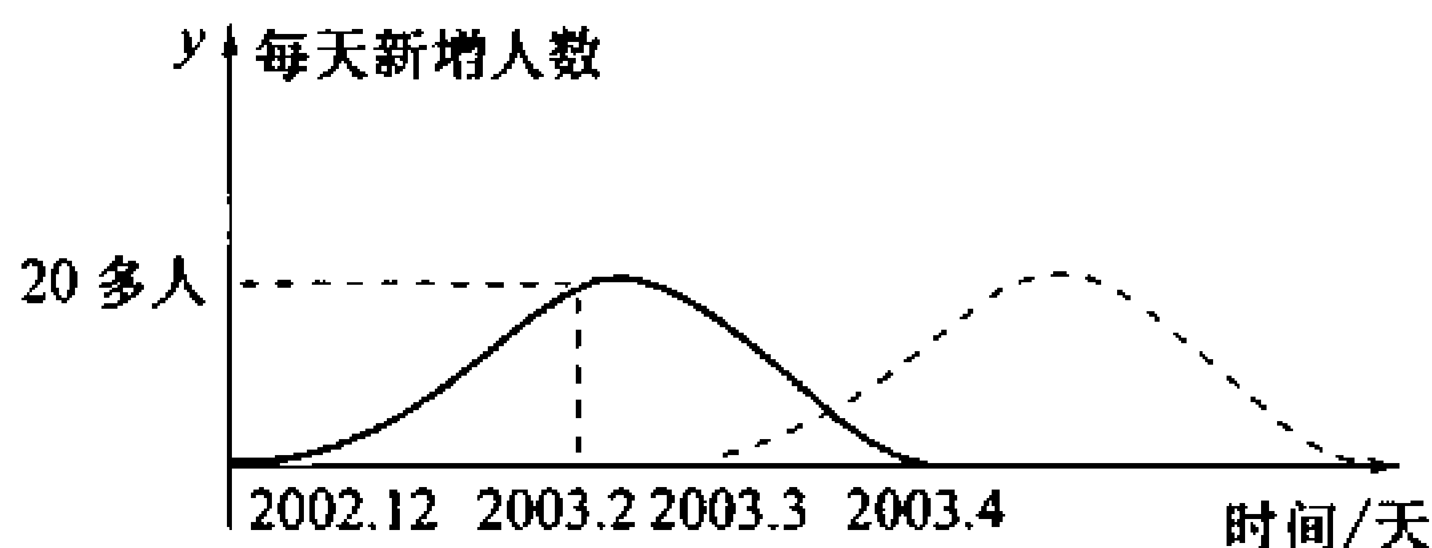


图 9.13　每天新增人数

从这条曲线可以得知，广州"非典"的大爆发时期，大约从 2003 年 2 月初开始以后的 10 天左右，每天新增病人数 20 多人。这条曲线形状像"Ω"，不妨称之为"Ω"型曲线。

根据中医理论，"癸未疫，二之气"，可以猜测，如果在 2003（癸未年）春季的华北地区发生大面积的流行性传染病的话，这一疾病的高峰期处在两个节气——春分（3 月 21 日）到小满（5 月 21 日）之间。因此只要将广州"非典"每天新增病人数曲线，沿着时间轴向右移动一段时间即可，其高峰应是 3 月 21 日到 5 月 21 日。

2003 年 3 月中旬，北京发生了"非典"，那么北京"非典"每天新增病人数曲线的起点即可以确定了。要想准确画出这条曲线，还缺少一个关键数据，那就是高峰平缓期时，北京每天所增加的病人数。作者认真地观察记录着权威部门公布的北京"非典"每天新增病人数情况，发现 2003 年 4 月 20 日起，每天新增病人数达到 100 多人，继续观察 5 天，到 2003 年 4 月 25 日，仍然维持在每天新增病人数 100 多人，从而可以确定从 2003 年 4 月 20 日到 2003 年 4 月 30 日为北京"非典"高峰平缓期。这样一来，只需将广州"非典"每天新增病人数曲线向右移动到以 3 月中旬为起点，以"二之气"为严重发病期，以 4 月 20 日至 4 月 30 日为高峰平缓期后，再沿着 y 轴，向上拉伸一定的倍数，即高峰平缓期的人数比，就可以得到北京的"非典"每天新增病人数曲线了，如图 9.14 所示。

根据这条曲线，就可以对北京"非典"每天新增病人数进行预测了。

从 2003 年 3 月中旬到 4 月 20 日，从零星发病，到快速增长，再到每天新增 100

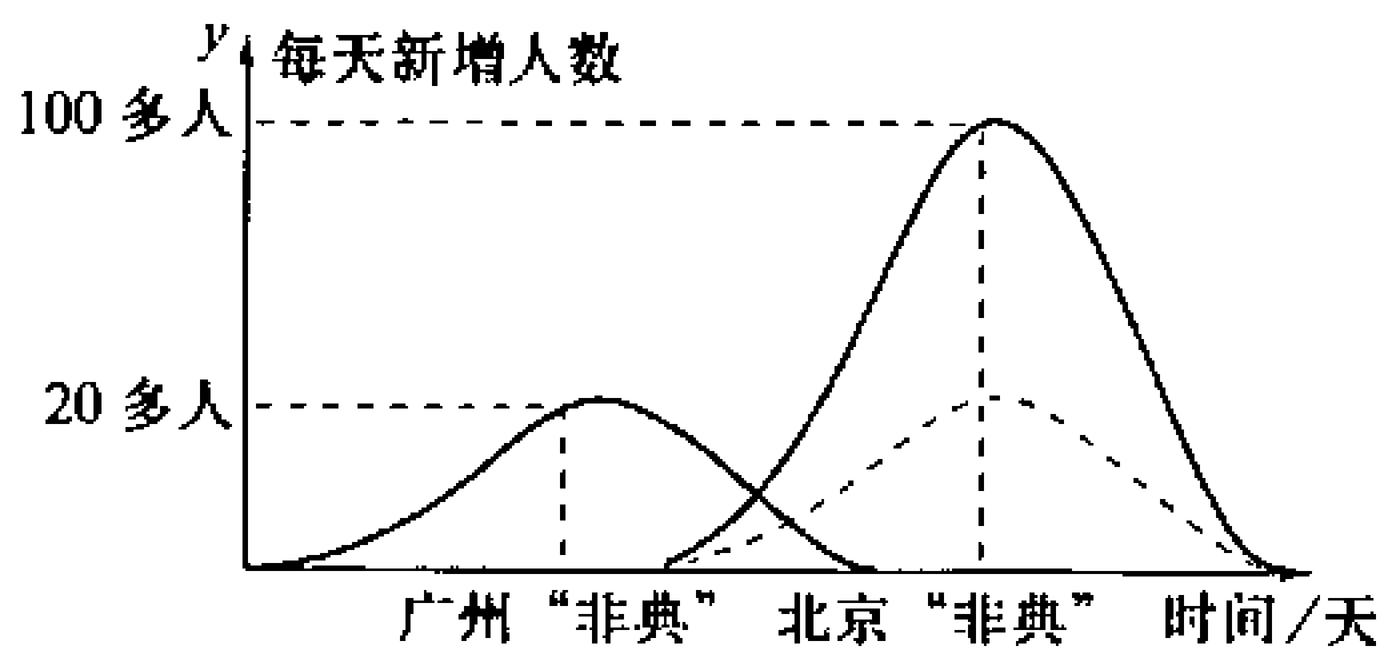


图 9.14 广州与北京的每天新增人数

多人；

从 2003 年 4 月 20 日到 4 月 30 日，处于高峰平缓期，每天新增病人数 100 多人；

从 2003 年 5 月 1 日到 5 月 10 日，从每天新增 100 多人，降到每天新增 50 多人；

从 2003 年 5 月 11 日到 5 月 20 日，从每天新增 50 多人，降到每天新增 10 多人；

从 2003 年 5 月 21 日到 5 月 31 日，从每天新增 10 多人，降到每天新增个位数；

到 2003 年 6 月 1 日，可能出现零增长，到 6 月 10 日，稳定在零增长上。

流行病进入全面恢复期，住院病人经过一段时间的康复，流行病结束。

根据上述曲线和每天新增病人数的预测，很容易计算出北京"非典"患病总人数将是 2655 人。国家卫生部官方网站 2003 年 8 月 7 日权威发布了北京"非典"患病总人数为 2522 人，可能不包括军人患病人数。

采用这一方法，可以预测病死率。病死率的定义是：

$$病死率=\frac{病死人数}{患病总人数}$$，但是在疫情过程中，很难确定。

作者给出一个便于操作的定义，截止到 t 时的动态病死率定义如下：

$$动态病死率\ \eta_t=\frac{截止到\ t\ 时的病死总人数}{截止到\ t\ 时的病死总人数+截止到\ t\ 时刻治愈的总人数},$$

例如，截止到 2003 年 5 月 1 日，病死 100 人，治愈 200 人，

则 $\eta_{5月1日}=\frac{100}{100+200}=33.3\%$，即截止 5 月 1 日的动态病死率为 33.3%。

只要得知截止到 t 时的病死人数和治愈人数，η_t 总是可以计算的，而且是准确的数值。

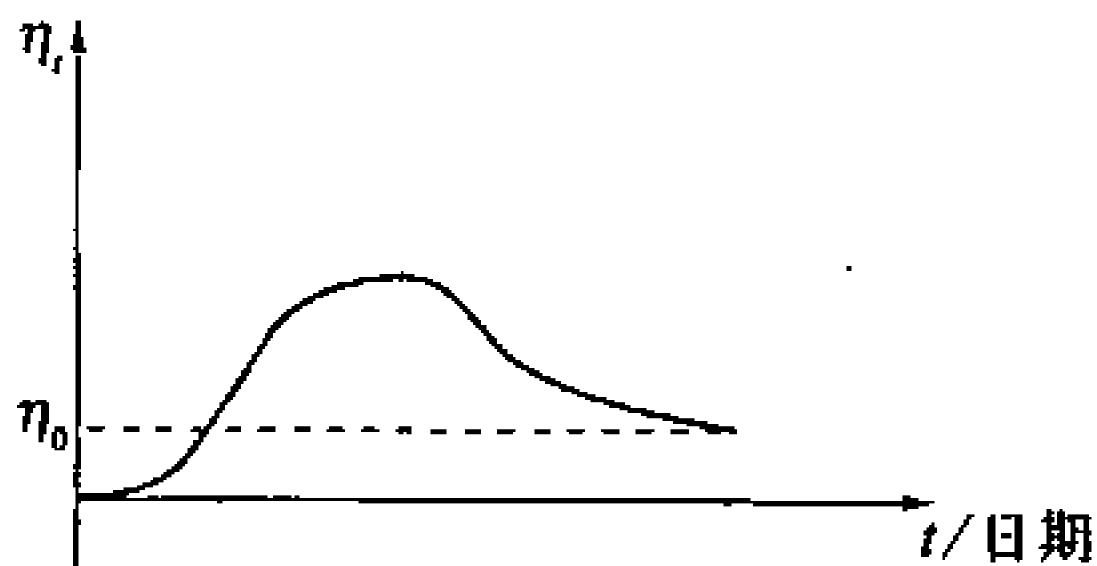


图 9.15 动态病死率

η_t 是日期 t 的函数，曲线如图 9.15

所示。

η_t 关于 t 的曲线也是先升后降的"Ω"型曲线，只是这条 η_t 曲线不会下降到 t 轴上，随着疫情的接近尾声，越来越接近一条水平直线，即

$$\lim_{t\to\infty}\eta_t = \eta_0$$

其中 $t\to\infty$ 表示疫情结束的时间 T_0。可见，关于时间 t 的动态病死率的极限值 η_0 就是通常意义下的病死率。

描绘与比较广州"非典"和北京"非典"的动态率曲线，可以看出到2003年4月下旬，广州"非典"的 η_t 曲线接近水平值3.7%，而北京"非典"的病死率大于或等于8%。

2003年国家卫生部权威公布的数字表明广州"非典"病死率3.7%，北京"非典"病死率8%，如图9.15所示。

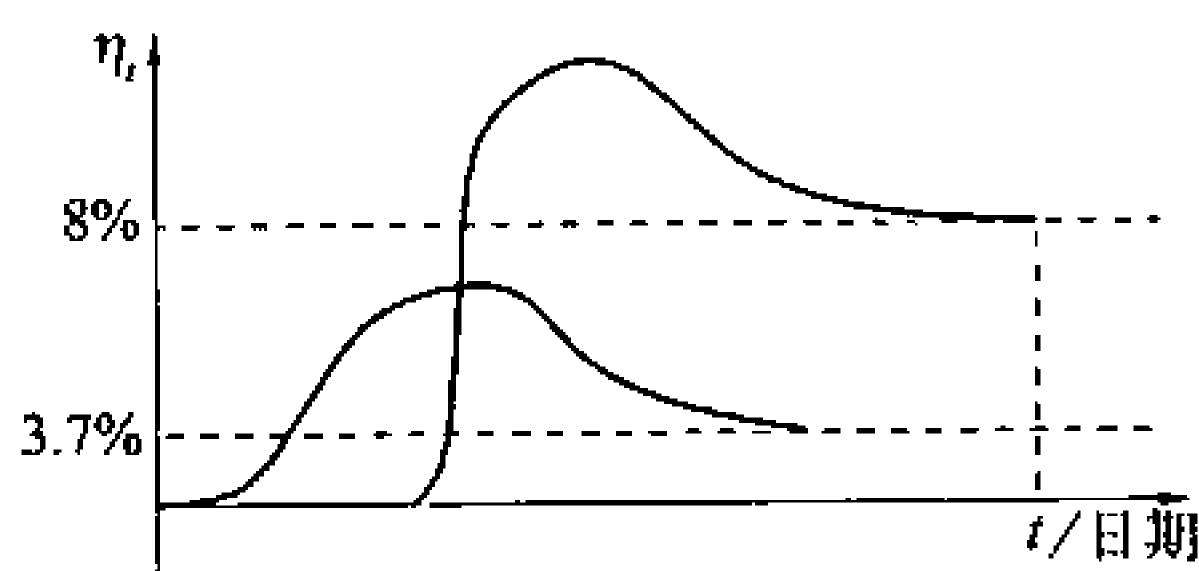


图9.16 广州"非典"和北京"非典"的动态病死率

提前准确预测季节性传染病的患病总人数和病死人数，探索病毒源头与传播途径，对于政府部门集中调用医疗资源和有效防控是非常重要的。

2003年4月底到5月底，作者将"非典"疫情的预测报告分别寄给了广州的钟南山院士、北京市卫生局梁万年副局长，以及北京市"非典"疫情防控中心的高明哲教授等，以4篇论文的形式分别投寄给相关学术杂志与出版社。

作者还于2003年9月2日，《哈军工（国防科技大学）成立50周年学术报告会》上，做了专题报告；于2003年9月28日在中国工程院大楼召开的中国未来研究会学术年会上，做了专题报告。

寄到杂志社的这些学术论文，被先后刊出：

（1）《装备指挥技术学院学报》（2003年4期，刊号CN11—3987/G3），第98～101页，刊登本书作者的论文，论文中给出了北京"非典"疫情患病总人数与病死人数的预测。

（2）光明日报出版社出版《中国新时期人文科学优秀成果精选》（2003年8月，ISBN—7—80145—645—9），第432－434页，刊登本书作者的论文，论文中指出："免疫力应包括两个方面：识别力和战斗力。对某种病毒不识别，一味提高战斗力，只会适得其反。发热到38.5℃～39℃是人体杀死"非典"病毒的方式，没有能力发热到38.5℃的老年体弱者易病死，同样是不识别，战斗力弱的婴幼儿与艾滋病人不易感染。

（3）《中国健康教育》杂志（2004年第6期，刊号ISSN 1002—9982，CN11—2513/R），第566－568页，刊登本书作者的论文，论文中提出：在大面积人群中注

射丙种环蛋白、胸腺肽等,对"非典"的预防无益,对"非典"的治疗有害。长时间战斗在"非典"防治第一线的医务人员,应注意轮休,他们容易感染"非典"病毒的原因,不是因疲劳造成免疫战斗力减弱,而是因疲劳造成防护措施不到位。论文中还提出,根据中医理论五运六气之说,华北地区,癸未疫,二之气,即疫情高峰期应在2003年的3月21日春分到5月21日小满两个节气之间。

(4)《中国21世纪理论与发展优秀论坛经典》一书(2005年2月出版,ISBN—7—104—02059—4),第1212-1214页,刊登本书作者的论文,论文中指出:"非典"的病源可能是蝙蝠,应组织医学人员到远离大陆的人迹罕至的海岛的洞穴中提取蝙蝠的血样,传播途径很可能是探险者、生存训练者吞食蝙蝠引发的大面积爆发。

关于病原体的这一预测在"非典"疫情过去五年以后得到证实。《北京青年报》2008年11月28日B3版——"美科学家实验室重建非典病毒"报道说,美国科学家在2008年11月25日在新一期《美国科学院学报》电子版上报告说,曾肆虐全球多个国家和地区的"非典"来源于蝙蝠。来自北卡罗来纳大学和范德比尔特大学的科学家在报告中介绍,他们重建的是蝙蝠身上的"非典"冠状病毒。科学家认为,蝙蝠身上的"非典"病毒发生一定变异后,会传染到人身上,并不断传播。领导这项研究的北卡罗来纳大学流行病专家巴里克说:"现在我们能够设计并合成各类"非典"病毒,这将成为防治未来可能的'非典'疫情的重要一步。"

最后,必须关注的是,当一场突如其来的流行性传染病到来的时候,政府首先想到的是,一方面如何稳定社会,使群众树立信心,相信政府有能力控制疫情;另一方面命令卫生管理部门尽快找到病源,拿出切实可行的防治和控制措施。卫生管理部门在社会和政府的双重压力下,能够紧急动员的智力资源是有限的,防疫部门、医院的医生、药品制造商等,都是被首先考虑的对象。卫生管理部门能够拿出来的防治防控措施,首先是注意个人卫生、集体卫生、环境卫生,其次是推荐有效的治疗方法和防控方案,当然总会涉及研制疫苗等。在突如其来的流行性传染病到来的时候,表现最主动最活跃的莫过于药品制造商,他们会推出各种游医大师,忽悠政府、忽悠卫生管理部门、忽悠群众,采用他们推荐的药品,可以有效地防治和防控,甚至可能会成为利益共同体。在没有突如其来的流行性传染病肆虐的时候,夸大某种传染病的危害和渲染养身保健的功效,仍然会形成这样的利益共同体。

《北京青年报》2010年6月6日B1版报道,欧洲委员会议员代表大会下设机构(社会卫生和家庭事务委员会)和英国一家知名医学期刊(英国医学期刊)6月4日分别发布报告,指认世界卫生组织夸大甲型H1N1流行性感冒威胁,应对疫情策略受到治药企业左右,采纳与制药企业"有染"的3名"专家建议",鼓励各国政府扩大疫苗采购量,带给治药企业丰厚利润,收受瑞士罗氏制药公司和英国葛兰素—史可公司提供的咨询费。世界卫生组织发言人哈特尔在接受美国《华盛顿邮报》

记者电话采访时说，报告有关世界卫生组织夸大甲型流感威胁的说法“不准确且不负责任”，但承认世界卫生组织一些专家与药企有关联。为回应外界质疑，世界卫生组织已成立独立调查小组，审查自身应对甲型流感的措施，调查“专家建议”是否涉及个人利益。《北京青年报》2010 年 9 月 12 日，A2 版的每日评论称，“人们一直没有真正等到甲流大爆发，据周四央视晚间新闻的消息，世界卫生组织被调查的十五个专家中，有五个已经确认和制药企业有染。”

《北京青年报》2010 年 6 月 7 日 A2 版报道，经过一段时间的喧嚣之后，号称“中国食疗第一人”的张悟本神话终于破灭了，他的经营场所“悟本堂”被认定为违章建筑而被拆除，其本人在公共场合基本销声匿迹，其著述的《把吃出来的病吃回去》遭遇下架处理。新华社记者近日在采访中发现，实际上，在张悟本的背后有一个利益团体在运作和推动这个骗局。

9.11 医院里的经历

2006 年 5 月 25 日，单位卫生处组织干部到定点医院进行一年一度的例行体检。体检是在医院的门诊大楼里进行的。医院为了方便受检者找到相应的科室，将每一批的受检者分成若干个小组，每个小组由一名导检员带领，楼上楼下地穿行，有时走了很长的路，爬了几层的电梯，走进一个诊室，只是一个很简单的检查项目。几个普通的检查项目，要花费一整天的时间，还搞得很疲劳。既然是每年例行的体检，建一座体检大楼是必要的，内部的科室设置不必照搬门诊大楼的结构，有些体检项目可以合并进行。例如，研制一种多功能体检床。一间大的体检房间里，可以隔断放置多个多功能体检床，可以打破原有门诊科室的界限，同时进行几个项目的检查。例如，内科听诊、脉搏、呼吸、心电图、腹部 B 超等项目。身高、体重、内科、外科、透视、抽血等，只需要几间大的体检房间就可以了，不必楼上楼下地穿行，不仅可以节约空间和设备，而且可以充分利用医疗资源，减少了医生和受检者的疲劳程度。

2008 年 3 月初，本书作者带一位病人到 COB 医院看病，遇见了几件事，觉得很有意思。首先去办理住院，办理住院和办理出院在一个窗口，已经排了一个长长的队伍，作者排在 10 名以后，本来以为至少半个小时才能挨到服务号，没想到只有短短的 5min 就挨到服务号了。为什么呢？原来前面有好几个排队者都是办理出院的，他们因为种种原因，由于手续不全，不能办理出院手续。这些原因是：被临时分别口头告知，办理出院必须提前一天由所在的病房科室的主治医生提出出院报告，通过医院的网络传到出院窗口，而目前这个信息还没有传到出院窗口；办理出院的病人需要携带主治医生开具的携带药物的处方单，而办理出院的病人没有携带；办理出院的病人必须携带住院时交付住院费的收条；办理出院的病人在入院时交付

的住院费没有用完，需要退给病人，但出院窗口当时没有足够的现金。等到作者挨到服务号时，作者提出一个建议，为什么不在住院出院窗口安装一个制式的住院出院告示呢？告诉办理者，需要提供什么材料。另外，既然通过网络传送信息，不必要提前一天，可以随时办理。至于主治医生开具的处方可以通过网络传输到住院出院窗口，由窗口提前打印好，病人随来随办。至于足够的现金更不是问题，网络传送的信息到达，即可做好各种准备。不久，医院就采纳了这一建议，住院出院窗口拥堵现象和效率不高的情况得到明显好转。

2008 年 3 月中旬，医院对病人进行了全面检查，诊断为肝硬化晚期，引起“腹水”。本书作者就肝硬化病人的症状，对主任医生谈了对治疗方案的理解和预测。作者说：“一个肝硬化的病人，肝脏本来是一座水库，水库沉积了许多污泥，上游的来水受阻，上游的渠道就会出问题，食道、胃、十二指肠因为有腔体极易出血，脾脏没有腔体，就会形成堰塞湖，堰塞湖就像一个气球，越吹越大，坝体越来越薄，薄得出现很多裂缝，血液中个头比较小的血小板、白血球就漏出来了，这就是肝腹水。也就是说，肝腹水里的“水”，不是水，而是血清。脾脏的一些裂缝自动愈合了，有一些裂缝出现了，脾脏的表面就会出现千沟万壑、纵横黏连的情况。这种情况十分危险，尽快进行肝移植是第一选择。”

当然供体与受体的血型必须一致，这是可以提前知道的。但供体的胆管与受体的胆管粗细不一致，在打开腹腔之前是不完全清楚的。当遇到这种情况，作者建议：“一旦胆管粗细不一致，这需要将胆管细的一方，斜切一个断面，将这个椭圆形的断面捏成一个正圆，再对接缝接。这样缝接后的胆管就会出现弯度，胆管细的一侧在吻合口处也会发生收缩狭窄，从而会发生胆汁淤积造成胆管堵塞的现象。”

医生说：“胆管一旦发生堵塞，采用目前常用的手法，经过皮肤然后穿过肝脏进入胆管，植入一根粗 3mm 的导管，直达吻合口，一方面可以疏通胆管，另一方面可以将淤积的肝汁引流出体外，从而减轻胆管堵塞的痛苦。”

2008 年 4 月 3 日，本书作者带来的病人，进行了肝移植，术后一个月需要到 B 超检查室做检查。在 B 超室外挤满了等待检查的病人，作者初步询问调查了几位，发现主要是三种情况：有刚从门诊室带着门诊医生开具的检查报告单来的病人，有已经住在医院的内科病房需要定期检查的病人，有刚刚做过肝移植需要尽快做检查的病人。无论是一个人走上楼的，还是被人用轮椅推上楼的，还是由几个人用担架床抬上楼的，一律统一排队挨号，检查室外人声鼎沸、拥挤不堪。作者就悄悄地对管理人员建议，是否考虑排成三个队：一是用担架抬来的肝移植病人，随到随检查；二是门诊来的病人按顺序排队检查；三是用轮椅推来的住院病人可以稍后安排。管理人员很快对排队的病人进行了调整，秩序很快就安定下来，这项临时性的措施，后来被医院固化为规定。

病人肝移植后，在医院住了半个月，办理出院手续，发现出院窗口的秩序明显

好转，接着就到药房去药，发现取药窗口拥挤不堪，为什么呢？原来，发药的工作人员把一篮子药品清点给病人以后，不提供袋子。而几乎所有的病人都没有提前自己准备好包装药品的袋子，被告之，需要病人到挂号处，与就诊者一起排队挂号，等挨到你的号时，花费5角钱，购买一个塑料袋，然后回来清点包装你的药品。如此取药，窗口不拥堵才怪呢。作者照此办理，取药就花费了40min。作者找到医院的一位工作人员，对他说，你肯定没有意识到医院在制造混乱，为什么不在取药窗口免费提供包装袋呢？这位工作人员说，上级规定不让免费提供塑料袋。作者说，为什么不能免费提供布袋子呢？在布袋子上印制医院的广告宣传，不是可以剩下一大笔广告费吗？作者的这一建议，很快被医院采纳了。

2008年5月6日，本书作者带来的病人，肝移植后病情出现了一些反复，最担心的是胆道吻合口被胆泥堵塞了，后来医生采取了预案，从右侧肋骨插入导管，进入吻合口，引流排出沉积物，病人的胆道胀疼有所缓解。本书作者认为，这不是根本解决问题的办法：胆汁应该是经过胆管排入十二指肠，参加消化，而不应该从吻合口处被引流出来，再说本来只有粗4mL的胆管，中间插入了一根粗3mL的引流导管，不是更增加胆汁淤积的可能吗？还有，粗3mm的引流管，内径可能只有1mm，引流出来的是“清水”，那么留下的“渣子”不是更容易淤泥吗？医生说，有这个可能。

本书作者建议：“通过下胃镜的办法，将胃管插入到十二指肠，然后进入胆管，用胃镜探头上的刀片清除吻合口处的胆汁；然后拔出胃管，将引流导管接上吊瓶，通过消炎点滴的办法，清洗吻合口，清洗完毕，即拔掉引流导管。”医生说：“再出现淤积怎么办？还是保留引流导管比较保险。”本书作者说：“还是拔掉引流导管，一旦出现淤积，再进行同样的办法处理。”在本书作者的迫切请求下，医生终于同意了这一建议。共进行了两次这样的手术，一次是在北医三院做的，另一次是请大连的专家做的，两次手术都比较顺利。关键是拔掉引流导管，病人减少了痛苦。后来实践证明，这个办法是成功了。本书作者看到环卫工人疏通下水道时的情景，一边用竹条子在下游捅，一边用水龙头从上游冲，受到了启发。

本书作者为了守候病人，有一天晚上就住在医院西侧的招待所里。2008年5月24日的早晨，5:30起床去结账，大厅里总服务台没有人值班。上午11:30，本书作者又返回招待所，喊了几声要结账，仍然无人应答。本书作者于下午1:30再次来结账，被告知，已经超过了中午12:00，必须多增加半天的房租费。作者说，已经来过两次了，没有人值班。服务人员说，这是我们的规定。本书作者结清了账目，并让服务员转告经理，如何改变经营理念，提高招待所的效益。例如，在大厅的总服务台上，让顾客醒目地看到招待所的“入住须知”，不应该把行业的“潜规则”当作“明规定”，办理入住手续时，服务员要对顾客特别提醒，包括价位、作息、结算时间，等等；如，总服务台必须24h值班，安保人员必须敬业。另外，本书作者还要说，

为什么酒店、饭店、招待所要执行中午 12:00 前的结算“潜规则”呢？从哪一方面讲，都没有理由。对于顾客来说，带来的不方便是显然的，为了在中午前离开，午饭必须在办理结算手续后，到其他地方就餐，这样一来就会影响本店的效益。本书作者相信，如果北京有一家酒店、饭店、招待所，敢于破除“潜规则”，第一个吃螃蟹，例如，改为 14:00 前结算，那一定会带来可观的效益。令人惊喜的是，2009 年 6 月 3 日，《北京青年报》A10 版报道，国内 300 家知名酒店，公开向“12 点退房”行规发出挑战。更令人惊喜的是，2009 年 9 月 5 日，《北京青年报》A7 版报道，新版《中国旅游饭店行业规范》日前悄然公布，以前“12 点退房”的老规定，被“饭店应在前厅显著位置明示客房价格和住宿时间结算方法”所取代。

参考文献

[1] 百度百科. 曼哈顿计划[EB/OL]. [2010-10-13]. http://zhidao.baidu. Com/question/19251027.html? fr = idnw.

[2] 百度百科. 阿波罗计划[EB/OL]. [2010-10-22]. http://zhidao.baidu.com/question/1252466.html.

[3] 刘兆世. 航天与系统工程[M]. 北京：中国宇航出版社，2006.

[4] 胡保生，彭勤科. 系统工程原理与应用[M]. 北京：化学工业出版社，2007.

[5] 百度知道. 鱼钩与长毛的故事[EB/OL]. [2009-1-9]. http://zhidao.baidu.com/questioey 81784282.html.

后　记

本书是在陈庆华与李晓松、张炜、李元左、陈浩光等人合作的《系统工程理论与实践》的基础上，修订完成的。

该著作以装备管理领域的实际问题为牵引，以提高装备管理领域的决策优化水平为目的，论述了系统、系统工程、系统工程方法论等基本概念；研究了系统工程常用的运筹学方法，运用首创的线性规划“定界对偶算法”解决系统工程中的对偶问题；依据所提出的系统工程方法论的基本逻辑程序，对所涉及的系统分析、系统预测、系统模型、系统模拟、系统评价、系统决策等辩证过程，结合案例分析进行了深入研究。

作者在描述系统的概念时指出，系统既是客观存在，又是人们解决客观世界的无限性与人们认识世界的有限性这一矛盾的通用的思维方式和处理方法；作者在描述系统工程的概念时指出，关于系统工程概念的描述，国内外有很多种说法，但美国科学技术辞典的定义更准确，系统工程强调的是，要使得组成系统整体的各子系统的功能全面、协调、可持续地发展，致使系统整体达到最优目标，还要充分发挥系统中人的作用。这就是说，系统工程在方法论层面上来说，它的哲学基础就是科学发展观。采用系统工程的理论与方法解决实际问题，必须首先学习和树立科学发展观；学习和树立科学发展观不仅是系统工程人员首要的必修课，而且是必备的思想武器。

作者亲身经历的案例涉及：1969 年的渤海海潮和地震预测，1982 年的长沙交通优化，1983 年湘潭钢铁厂的技术改造方案论证，1983 年洞庭湖区“垸子”的退耕还湖问题，1988 年东风汽车制造厂轿车总装厂选址论证，1988 年资源城市（克拉玛依市）持续发展与阿尔泰山降雨问题，1988 年长江三峡大坝高度问题，1997 年怀柔山区发展问题，2003 年“非典”疫情预测问题，2009 年总装机关干部“奥运家苑”住房分配问题，等等，其中有些案例被遴选入书。此外，作者还参与了军事领域的许多案例，如边境轮训期间的摩托化步兵师战斗开进、军用物资紧急调运、战备等级转换等，以及“神舟”一号发射计划网络图绘制、新形势下军事装备人才培训模式、应急作战装备保障能力评估等，由于保密原因，没有被遴选入书。对于著作中所遴选实例，无论其重要程度如何，作者都力求运用系统工程理论与方法加以分析研究。

作者从事系统工程理论研究和实际应用的30多年来，曾得到许国志、谢力同、汪浩等老一代科学家的指导，他们不仅指导作者开展理论研究，而且亲自带领作者开展应用课题研究，书中所列举的许多案例就是在他们指导下完成的。本书的完成，实际上就是作者在老一代科学家的指导下，开展系统工程研究的阶段总结。当然，作者关于系统工程的研究还很肤浅，还需要不断地探索和深化。

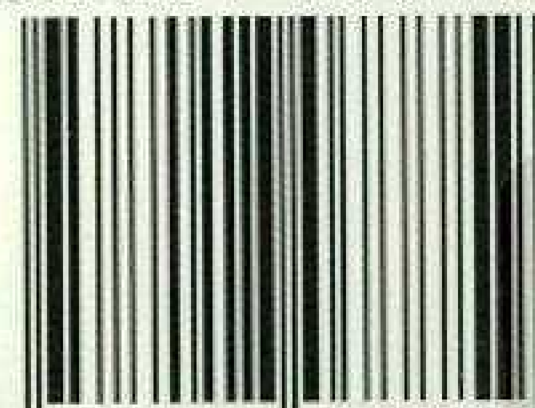
吕彬　1967年5月出生，陕西咸阳人，现任中国国防科技信息中心管理政策研究室主任、研究员，装备学院博士生导师，总装人才战略工程资助对象。多年来，重点围绕装备建设领域相关问题开展了卓有成效的研究工作，取得了多项重要成果，获军队科技进步一等奖1项、二等奖9项，出版专著5部，发表学术论文30多篇。博士论文《装备采办风险辨识与评估研究》，于2009年被评为全国百篇优秀博士论文，先后荣立二等功1次、三等功1次。

李晓松　1981年11月出生，安徽宿松县人，2010年装备学院军事装备学博士研究生毕业，现为中国国防科技信息中心博士后。重点围绕装备决策优化问题开展研究，获军队科技进步二等奖1项，三等奖1项，出版专著2部，发表学术论文30余篇，博士论文于2010年被评为总装备部优秀博士论文，荣立三等功1次。

责任编辑：辛俊颖　　just4xin@yahoo.com.cn
　　　　　王坡麟　　plwang@ndip.cn
责任校对：钱辉玲
封面设计：蒋秀芹

http://www.ndip.cn

ISBN 978-7-118-07775-9



定价：42.00 元